

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

SECAGEM NATURAL E DISPOSIÇÃO FINAL  
DE  
LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

NÚRIA ABOY

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre, janeiro de 1999

## APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Francisco Ricardo Andrade Bidone.

### AGRADECIMENTOS:

Ao Professor. Francisco Ricardo Andrade Bidone pela orientação e compreensão durante todo este trabalho.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

À Professora Carmen Barros de Castro pelo apoio e ao Professor Lawson Beltrame por permitir a montagem do experimento no laboratório de Engenharia de Água e Solo.

Aos técnicos do laboratório de Técnicas Ambientais do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH, pela auxílio técnico na realização das análises.

Aos funcionários da estação de tratamento de água São João/Navegantes, operada pelo DMAE, pela dedicação e cuidado na coleta do lodo, uma tarefa indispensável para a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Solos da UFRGS pelo apoio na realização de algumas análises.

Aos colegas do IPH, pela convivência solidária durante o curso de mestrado.

## RESUMO

No presente trabalho, estudou-se em escala de laboratório a desidratação natural de lodos de ETAs, com a utilização de leitos de secagem com meios drenantes/filtrantes constituídos por areia e/ou mantas geotêxteis.

O desempenho dos leitos montados em recipientes plásticos e em copos becker de volumes conhecidos, foi avaliado através do controle de parâmetros como umidade e alumínio total no lodo, e pH, DQO, cor, turbidez e alumínio total no líquido drenado. Adicionalmente, realizou-se incursões no lodo, analisando-se macro e micronutrientes.

Os leitos foram constituídos por areia de granulometria variável, com espessura de 16, 23 e 30 cm, respectivamente, em uma primeira fase do experimento; em um segundo momento, utilizou-se leitos com mantas geotêxteis não trançadas de fabricação nacional (mantas XT-4, OP-20, OP-30, OP-40 e OP-60); em um terceiro momento da experimentação, utilizou-se leitos de areia com mantas geotêxteis.

A taxa de aplicação de lodo nos leitos foi da ordem de  $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , e este foi proveniente da ETA São João/Navegantes, operada pelo DMAE em Porto Alegre/RS. Nos leitos com meio drenante/filtrante de areia, foram utilizados o lodo velho que ficou estocado/conservado por aproximadamente 30 dias antes de sua disposição para secagem, e o lodo novo, aplicado nos leitos logo após sua retirada do decantador.

Após a desidratação nos leitos de secagem constituídos por areia, os lodos desidratados foram submetidos a uma sistemática de rega por soluções ácidas ( pH 6,5, 5,0 e 2,5 ), por um período de 15 dias, visando-se observar a possível solubilização/lixiviação do alumínio, na ocorrência eventual de chuvas ácidas, comprovadamente observadas na Região Metropolitana da grande Porto Alegre.

Finalmente, o líquido drenado durante a fase de desidratação em leitos constituídos por mantas geotêxteis foi aplicado sobre composto orgânico urbano, reproduzindo-se a aplicação de líquidos em solos, com a finalidade de observar-se a atenuação do alumínio pelas propriedades adsorptivas e quelantes que apresenta a matéria orgânica humificada.

Os resultados mostraram que os leitos de secagem são uma excelente alternativa para a desidratação de lodo de ETA. Os diferentes meios drenante/filtrante testados tiveram pouca interferência na carga de alumínio nos líquidos drenados, influenciando sim diretamente na qualidade do líquido percolado, em termos de cor, turbidez e DQO, e no tempo necessário para a desidratação, controlado pelos volumes coletados. O uso exclusivo de mantas geotêxteis reduziu o tempo de desidratação do lodo; no entanto, a qualidade do líquido drenado foi prejudicada, quando comparada com a dos leitos com meio drenante/filtrante de areia. A umidade final média de 80% na massa de lodo desidratada foi obtida praticamente em todos os meios drenante/filtrante testados. O lodo velho utilizado na primeira fase de operação permaneceu nos leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia por um período maior que o lodo novo; no entanto, a umidade final de massa de lodo desidratada foi a mesma.

A aplicação de soluções ácidas sobre o lodo desidratado em absoluto favoreceu a solubilização/lixiviação do alumínio, presente em grandes concentrações na massa parcialmente seca.

O composto orgânico urbano utilizado como instrumento de polimento do líquido percolado, mostrou-se definitivamente eficaz na atenuação do alumínio.

## ABSTRACT

This present work studied natural dewatering of water treatment sludge, in a laboratory scale, using dry beds with sand draining / filtering media and geotextile blankets.

Beds Performance, assembled on plastic recipients and in beaker glasses of known volumes, was evaluated by the control of the variables such as moisture and total aluminum in the sludge, and pH, COD, color, turbidity, total aluminum in drained liquid. In addition, was analyzed the macronutrients and micronutrients contents in the sludge.

Beds were made using by sand of variable granulometry, and a thickness of 16, 23 and 30 cm, respectively, in the first stage of the experiment; in a second moment were utilized not tressed geotextile blankets of a national brand (blankets: XT-4, OP-20, OP-30, OP-40 and OP-60); in the third stage were utilized sand beds with geotextile blankets.

The theoretical sludge application rate was  $0,30 \text{ m}^3 / \text{m}^2$ . The sludge came from the São João/Navegantes Water Treatment Plant (WTP), operated by the Municipal Department of Water and Wastewater in Porto Alegre/RS/Brazil. In the sand beds with draining/filtering media were used the old sludge stored / conserved for about 30 days before its disposal to dry on the sand beds, and the new one, which was applied on the beds right after its removal from the settling tank.

After dewatering on the drying sand beds, the dewatered sludges were submitted to a systematic acid watering (pH 6,5; 5,0 and 2,5), through 15 days, in order to observe the possible solubilization/leaching of aluminum, simulating fortuitous acid rains, evidently observed to occur in the Porto Alegre's metropolitan area.

At last the liquid drained during dewatering phases on geotextile blankets beds was applied upon organic urban compost, simulating disposal of liquids on soils. This was intended intending to observe aluminum attenuation due to adsorptive/chelating properties present in organic matter.

Results showed that drying beds are an excellent alternative to WTP sludge dewatering. The different draining / filtering media tested had a little interference in the cargo of aluminum present in drained liquid. However the different media had direct influence on thickened liquid quality, in terms of color, turbidity, COD, and in the necessary time for dewatering, controlled by the collected volumes. Exclusive use of blankets reduced dewatering time; however, drained liquid quality was changed, when it compared to sand bed. Media moisture of 80 % in dried sludge mass was obtained almost in all draining/filtering media tested. Old sludge used in first stage of operation continued in drying beds with sand draining/filtering media throughout a longer period than the new one; but the final sludge mass moisture was the same.

Application of acid solutions on dried sludge absolutely promoted solubilization / leaching of aluminum, present in great concentrations in the partially dried mass.

Organic urban compost used as a finishing instrument for the leached liquid, showed definitively effective on attenuating aluminum.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	4
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
3.1. Composição e origem do lodo .....	5
3.1.1. Origem do lodo.....	5
3.1.2. Composição do lodo .....	5
3.1.3. Alumínio.....	9
3.1.3.1. Alumínio e os seres vivos.....	12
3.2. Método de desidratação.....	14
3.2.1. Aspectos gerais dos métodos de desidratação .....	15
3.2.2. Acondicionamento do lodo .....	16
3.2.3. Secagem natural do lodo.....	16
3.2.4. Desidratação mecânica.....	19
3.2.5. Vantagens e desvantagens dos métodos de desidratação.....	21
3.3. Recuperação do alumínio.....	23
3.3.1. Método de recuperação ácida e alcalina do alumínio .....	24
3.3.2. Etapas do processo de recuperação .....	25
3.3.3. Influência das características do lodo no processo de recuperação do alumínio .....	26
3.4. Disposição final do lodo de ETA .....	27
3.4.1. Descarte com esgoto doméstico .....	27
3.4.2. Disposição no solo.....	28
3.4.3. Uso do lodo no processo de floculação .....	32
3.4.4. Disposição do filtrado do lodo .....	33
3.4.5. Disposição em aterros sanitários .....	33
3.4.6. Estudo da viabilidade técnica-econômica de tratamento e disposição final de lodo de ETA.....	35
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	37
4.1. Aspectos gerais .....	37
4.2. Lodo de ETA e composto orgânico utilizados na pesquisa.....	38
4.2.1. Lodo de ETA .....	38
4.2.2. Composto orgânico .....	39

4.3. Análises físico/químicas .....	41
4.4. Construção dos quatros experimentos e sua finalidade .....	42
4.4.1. <b>Experimento 1</b> .....	42
4.4.1.1. Primeira etapa.....	42
4.4.1.2. Segunda etapa .....	47
4.4.2. <b>Experimento 2</b> .....	50
4.4.2.1. Conjunto de leitos de secagem com mantas geotêxteis como meio drenante/filtrante .....	50
4.4.3. <b>Experimento 3</b> .....	52
4.4.4. <b>Experimento 4</b> .....	53
4.4.4.1. Sistema de vasos com composto orgânico .....	53
<b>5. RESULTADOS</b> .....	56
5.1. <b>Experimento 1</b> .....	56
5.1.1. <b>Experimento 1-fase 1</b> .....	56
5.1.1.1. Desidratação do lodo velho.....	56
5.1.1.1.1. Lodo .....	56
5.1.1.1.2. Percolado .....	59
5.1.1.2. Desidratação do lodo novo .....	60
5.1.1.2.1. Lodo .....	60
5.1.1.2.2. Percolado .....	63
5.1.2. <b>Experimento 1-fase2</b> .....	64
5.1.2.1. Solubilização/lixiviação do metal alumínio, a partir de lodo de ETAs desidratado em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia de diferentes espessuras, e submetidos à rega por soluções ácidas.....	64
5.1.2.1.1. Aplicação das soluções ácidas .....	64
5.1.2.1.1.1. pH.....	64
5.1.2.1.1.2. Alumínio .....	65
5.1.2.1.1.3. Cor e turbidez .....	67
5.2. <b>Experimento 2</b> .....	67
5.2.1. Desidratação do lodo de ETA em leitos de secagem com meio drenante/filtrante constituídos por mantas geotêxteis.....	67
5.2.1.1. Lodo.....	67
5.2.1.1. Percolada.....	70
5.3. <b>Experimento 3</b> .....	71

5.3.1. Desidratação do lodo de ETA em leitos de secagem com meio drenante/filtrante composto por areia e mantas geotêxteis.....	71
5.3.1.1. Lodo.....	73
5.3.1.2. Percolado .....	73
<b>5.4. Experimento 4 .....</b>	<b>73</b>
5.4.1. Polimento do efluente da desidratação do lodo de ETA em leitos de secagem com a utilização de composto orgânico.....	75
5.4.1.1. Fase da aplicação da água deionizada.....	75
5.4.1.1.1. Cor, turbidez e DQO .....	76
5.4.1.1.2. pH.....	76
5.4.1.1.3. Alumínio .....	76
5.4.1.2. Fase da aplicação de percolado dos leitos de secagem.....	77
5.4.1.2.1. Cor e turbidez.....	77
5.4.1.2.2. pH.....	77
5.4.1.2.3. DQO .....	77
5.4.1.2.4. Alumínio .....	78
5.5. Classificação do lodo de ETA.....	79
5.6. Macro e micronutrientes do lodo de ETA.....	81
<b>6. DISCUSSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>6.1. Experimento 1 .....</b>	<b>83</b>
6.1.1. Desidratação do lodo velho de ETA em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia .....	83
6.1.1.1. Lodo.....	83
6.1.1.2. Percolado .....	84
6.1.2. Desidratação de lodo novo de ETA em leitos de secagem com meio drenante .....	86
6.1.2.1. Lodo.....	86
6.1.3. Solubilização/lixiviação do metal alumínio, a partir de lodo de ETAs desidratado em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia de diferentes espessuras, e submetidos à rega por soluções ácidas .....	87
<b>6.2. Experimento 2 .....</b>	<b>88</b>
6.2.1. Desidratação do lodo novo de ETA em leitos de secagem com meio drenante/filtrante composto por mantas geotêxteis.....	88
<b>6.3. Experimento 3 .....</b>	<b>89</b>
<b>6.4 Experimento 4 .....</b>	<b>89</b>

6.4.1. Polimento do efluente da desidratação do lodo de ETA em leitos de secagem com a utilização de composto orgânico.....	90
6.5. Avaliação final dos métodos de desidratação estudados .....	91
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>94</b>
<b>8. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>98</b>
<b>10. ANEXOS</b>	
ANEXO A. Tabelas com os resultados .....	103
ANEXO B. Figuras com os resultados.....	125

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Principais características de dois tipos de lodo produzidos com coagulação .....	7
Tabela 3.2 - Concentração de metais pesados em lodos de ETAs e no solo .....	8
Tabela 3.3 - Vantagens e desvantagens entre os dois sistemas de desidratação .....	22
Tabela 3.4 - Quantidades de sólidos (%) na torta de lodo desidratado obtidas através de diversos métodos de desidratação .....	23
Tabela 3.5 - Substâncias contidas no lodo e sua influência na desidratação, acidificação e na operação de filtração do alumínio .....	26
Tabela 3.6 - Alternativas de tratamento do lodo para as ETAs da região metropolitana de São Paulo .....	35
Tabela 3.7 - Alternativas de tratamento do lodo para as ETAs da região metropolitana de São Paulo (continuação) .....	36
Tabela 4.1 - Características físico/químicas do lodo bruto de ETA .....	39
Tabela 4.2 - Macro e micronutrientes do composto orgânico .....	40
Tabela 4.3 - Características das camadas drenantes do leito de secagem .....	45
Tabela 4.4 - Esquema da distribuição dos leitos de secagem .....	49
Tabela 4.5 - Características das mantas geotêxteis .....	50
Tabela 4.6 - Identificação dos leitos de secagem com meio drenante/filtrante composto por mantas geotêxteis .....	51
Tabela 4.7 - Esquema da distribuição das mantas geotêxteis nos leitos de secagem .....	53
Tabela 4.8 - Taxas de aplicação do percolado dos leitos de secagem sobre o composto orgânico .....	54
Tabela 5.1 - Características do lodo bruto, no momento de sua disposição nos leitos de secagem (lodo velho) .....	57
Tabela 5.2 - Características do lodo desidratado, em cada leito, no final da experimentação (lodo velho) .....	57
Tabela 5.3 - Parâmetros físico/químicos analisados no percolado dos leitos de secagem (lodo velho) .....	60
Tabela 5.4 - Características do lodo bruto, no momento de sua disposição nos leitos de secagem (lodo novo) .....	62
Tabela 5.5 - Características do lodo desidratado, em cada leito, no final da experimentação (lodo novo) .....	62

Tabela 5.6 - Parâmetros físico/químicos analisados no percolado dos leitos de secagem (lodo novo).....	63
Tabela 5.7 - Carga de alumínio total (mg) observada nas amostras compostas de percolado dos leitos, analisados durante a aplicação das soluções ácidas .....	65
Tabela 5.8 - Carga de alumínio total (mg) observada durante as fases de desidratação e aplicação das soluções ácidas .....	66
Tabela 5.9 - Características do lodo bruto, no momento de sua disposição nos leitos de secagem (meio drenante/filtrante de mantas geotêxteis).....	69
Tabela 5.10 - Características do lodo desidratado, em cada leito, no final da experimentação (meio drenante/filtrante de mantas geotêxteis).....	69
Tabela 5.11 - Parâmetros físico/químicos analisados no percolado dos leitos de secagem (meio drenante/filtrante de mantas geotêxteis).....	71
Tabela 5.12 - Características do lodo bruto, no momento de sua disposição nos leitos de secagem (meio drenante/filtrante composto de areia e mantas geotêxteis).....	73
Tabela 5.13 - Parâmetros físico/químicos analisados no percolado dos leitos de secagem (meio drenante/filtrante composto de areia e mantas geotêxteis).....	74
Tabela 5.14 - Carga de alumínio total (mg) observada no lixiviados durante a aplicação de água deionizada sobre o composto orgânico.....	76
Tabela 5.15 - Característica do percolado .....	77
Tabela 5.16 - Carga total de DQO (mgO <sub>2</sub> ) aplicada e lixiviada dos vasos com composto orgânico.....	78
Tabela 5.17 - Carga total de alumínio (mg) observada durante a aplicação de percolado .....	78
Tabela 5.18 - Concentração de alumínio (%) no composto orgânico nas diferentes fases de experimentação .....	79
Tabela 5.19 - Carga total de alumínio (mg) aplicada e lixiviada dos vasos com composto orgânico.....	79
Tabela 5.20 - Resultados obtidos no teste de lixiviação de duas amostras de lodo desidratado de ETA.....	80
Tabela 5.21 - Resultados obtidos no teste de solubilização de duas amostras de lodo desidratado de ETA .....	81
Tabela 5.22 - Macro e micronutrientes de lodo desidratado de ETEs e de lodo de ETA de Porto Alegre .....	82
Tabela A.1. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 1(lodo velho)...	A1
Tabela A.2. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 2 (lodo velho)..	A1

- Tabela A.3. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 3 (lodo velho)..A1
- Tabela A.4. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 1 (lodo velho) A2
- Tabela A.5. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 2 (lodo velho) A2
- Tabela A.6. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 3 (lodo velho) A2
- Tabela A.7. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 1(lodo novo)....A3
- Tabela A.8. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 2 (lodo novo)...A3
- Tabela A.9. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 3 (lodo novo)...A3
- Tabela A.10. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 4 (lodo novo).A4
- Tabela A.11. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 5 (lodo novo).A4
- Tabela A.12. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 6 (lodo novo) A4
- Tabela A.13. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 1 (lodo novo)A5
- Tabela A.14. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 2 (lodo novo)A5
- Tabela A.15. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 3 (lodo novo)A5
- Tabela A.16. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 4 (lodo novo)A6
- Tabela A.17. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 5 (lodo novo)A6
- Tabela A.18. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 6 (lodo novo)A6
- Tabela A.19. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 1 (pH=6,5) ....A7
- Tabela A.20. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 2 (pH=6,5) ....A7
- Tabela A.21. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 3 (pH=6,5) ....A7
- Tabela A.22. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 4 (pH=6,5) ....A7
- Tabela A.23. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 5 (pH=6,5) ....A7
- Tabela A.24. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 6 (pH=6,5) ....A7
- Tabela A.25. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 1 (pH=6,5)...A8
- Tabela A.26. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 2 (pH=6,5)...A8
- Tabela A.27. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 3 (pH=6,5)...A8
- Tabela A.28. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 4 (pH=6,5)...A8
- Tabela A.29. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 5 (pH=6,5)...A8
- Tabela A.30. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 6 (pH=6,5)...A8
- Tabela A.31. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 1 (pH=5,0) ....A9
- Tabela A.32. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 2 (pH=5,0) ....A9
- Tabela A.33. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 3 (pH=5,0) ....A9
- Tabela A.34. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 4 (pH=5,0) ....A9
- Tabela A.35. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 5 (pH=5,0) ....A9
- Tabela A.36. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 6 (pH=5,0) ....A9

Tabela A.37. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 1 (pH=5,0).....	A10
Tabela A.38. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 2 (pH=5,0).....	A10
Tabela A.39. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 3 (pH=5,0).....	A10
Tabela A.40. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 4 (pH=5,0).....	A10
Tabela A.41. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 5 (pH=5,0).....	A10
Tabela A.42. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 6 (pH=5,0).....	A10
Tabela A.43. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 1 (pH=2,5) ..	A11
Tabela A.44. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 2 (pH=2,5) ..	A11
Tabela A.45. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 3 (pH=2,5) ..	A11
Tabela A.46. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 4 (pH=2,5) ..	A11
Tabela A.47. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 5 (pH=2,5) ..	A11
Tabela A.48. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 6 (pH=2,5) ..	A11
Tabela A.49. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 1 (pH=2,5).....	A12
Tabela A.50. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 2 (pH=2,5).....	A12
Tabela A.51. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 3 (pH=2,5).....	A12
Tabela A.52. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 4 (pH=2,5).....	A12
Tabela A.53. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 5 (pH=2,5).....	A12
Tabela A.54. Carga de alumínio total observada no percolado do leito 6 (pH=2,5).....	A12
Tabela A.55. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito com manta XT- 4.....	A13
Tabela A.56. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito com manta OP- 20.....	A13
Tabela A.57. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito com manta OP- 30.....	A13
Tabela A.58. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito com manta OP- 40.....	A13
Tabela A.59. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito com manta OP- 60.....	A13
Tabela A.60. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito sem manta (branco).....	A13
Tabela A.61. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito com manta XT-4.....	A14
Tabela A.62. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito com manta OP-20.....	A14

Tabela A.63. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito com manta OP-30.....	A14
Tabela A.64. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito com manta OP-40.....	A14
Tabela A.65. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito com manta OP-60.....	A14
Tabela A.66. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito sem manta (Branco) .....	A14
Tabela A.67. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 1 com manta XT-4.....	A15
Tabela A.68. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 2 com manta OP-30 .....	A15
Tabela A.69. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 3 com manta OP-60.....	A15
Tabela A.70. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 4 com manta OP-60 .....	A15
Tabela A.71. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 5 com manta OP-30 .....	A15
Tabela A.72. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do leito 6 com manta XT-4.....	A15
Tabela A.73. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 1 com manta XT-4.....	A16
Tabela A.74. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 2 com manta OP-30 .....	A16
Tabela A.75. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 3 com manta OP-60.....	A16
Tabela A.76. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 4 com manta OP-60.....	A16
Tabela A.77. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 5 com manta OP-30.....	A16
Tabela A.78. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do leito 6 com manta XT-4.....	A16
Tabela A.79. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 1 (água deionizada) .....	A17

Tabela A.80. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 2 (água deionizada).....	A17
Tabela A.81. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 3 (água deionizada).....	A17
Tabela A.82. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 4 (água deionizada).....	A17
Tabela A.83. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 5 (água deionizada).....	A17
Tabela A.84. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 1 (água deionizada).....	A18
Tabela A.85. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 2 (água deionizada).....	A18
Tabela A.86. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 3 (água deionizada).....	A18
Tabela A.87. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 4 (água deionizada).....	A18
Tabela A.88. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 5 (água deionizada).....	A18
Tabela A.89. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 1 (aplicação de percolado).....	A19
Tabela A.90. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 2 (aplicação de percolado).....	A19
Tabela A.91. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 3 (aplicação de percolado).....	A19
Tabela A.92. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 4 (aplicação de percolado).....	A19
Tabela A.93. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso 5 (aplicação de percolado).....	A19
Tabela A.94. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 1 (aplicação de percolado).....	A20
Tabela A.95. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 2 (aplicação de percolado).....	A20
Tabela A.96. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 3 (aplicação de percolado).....	A20

Tabela A.97. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 4 (aplicação de percolado).....	A20
Tabela A.98. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do composto orgânico no Vaso 5 (aplicação de percolado).....	A20
Tabela A.99. Comparação entre as cargas de alumínio lixiviados do lodo desidratado em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia, após a aplicação de diferentes soluções ácidas .....	A20
Tabela A.100. Comparação entre as cargas de DQO lixiviadas do composto orgânico (150 ml de água deionizada) .....	A20
Tabela A.101. Comparação entre as cargas de alumínio lixiviadas dos vasos com composto orgânico (150 ml de água deionizada) .....	A21
Tabela A.102. Comparação entre as cargas de alumínio lixiviadas dos vasos com composto orgânico (aplicação de cargas diferentes de percolado).....	A21
Tabela A.103. Comparação entre as cargas de DQO lixiviadas do composto orgânico (aplicação de cargas diferentes de percolado) .....	A21

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Processo de fracionamento do alumínio .....	11
Figura 3.2 – Efeito do lodo de ETA em solos coesivos .....	29
Figura 4.1 - Fluxograma das distintas etapas da pesquisa .....	38
Figura 4.2 - Desenho esquemático da construção do leito de secagem .....	43
Figura 4.3 – Curva granulométrica da areia.....	44
Figura 4.4 - Esquema dos leitos de secagem .....	47
Figura 4.5- Esquema dos leitos de secagem com mantas geotêxteis.....	52
Figura 4.6 - Esquema dos vasos com composto orgânico.....	55
Figura 5.1 – Desidratação do lodo velho em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia .....	58
Figura 5.2 – Lodo velho desidratado em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia .....	58
Figura 5.3 - Desidratação do lodo novo em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia .....	61
Figura 5.4 - Lodo novo desidratado em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia	61
Figura 5.5 – Carga de alumínio total observada no percolado durante a experimentação .....	66
Figura 5.6 – Vista geral dos <b>Experimentos 2 e 3</b> .....	68
Figura 5.7 - Lodo desidratado em leitos de secagem com meio drenante/filtrante constituídos por mantas geotêxteis .....	68
Figura 5.8 - Ensaio de sólidos sedimentáveis em Cone Imhoff .....	72
Figura 5.9 – Vista geral dos <b>Experimentos 2, 3 e 4</b> .....	72
Figura B1. Volume de líquido acumulados percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho) .....	B1
Figura B2. Cargas de alumínio acumuladas percoladas dos leitos com meio drenante de areia (lodo velho) .....	B1
Figura B3. Cargas de DQO acumuladas nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho) ...	B1
Figura B4. Concentração de cor nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho).....	B2
Figura B5. Concentração de turbidez nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho) .....	B2
Figura B6. Variação do pH nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho)	B2

Figura B7. Volume de líquido acumulados percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo).....	B3
Figura B8. Cargas de alumínio acumuladas percoladas dos leitos com meio drenante de areia (lodo novo).....	B3
Figura B9. Cargas de DQO acumuladas nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo)....	B3
Figura B10. Concentração de cor nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo) .....	B4
Figura B11. Concentração de turbidez nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo).....	B4
Figura B12. Variação do pH nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo)	B4
Figura B13. Volume de líquido acumulados percolados nos leitos com meio drenante de mantas geotêxteis.....	B5
Figura B14. Cargas de alumínio acumuladas percoladas dos leitos com meio drenante de mantas geotêxteis.....	B5
Figura B15. Cargas de DQO acumuladas nos leitos com meio drenante de mantas geotêxteis .	B5
Figura B16. Concentração de cor nos percolados nos leitos com meio drenante de mantas geotêxteis .....	B6
Figura B17. Concentração de turbidez nos percolados nos leitos com meio drenante de mantas geotêxteis.....	B6
Figura B18. Variação do pH nos percolados nos leitos com meio drenante de mantas geotêxteis .....	B6
Figura B19. Volume de líquido acumulados percolados nos leitos com meio drenante constituído por areia mantas geotêxteis .....	B7
Figura B20. Cargas de alumínio acumuladas percoladas dos leitos com meio drenante constituído por areia e mantas geotêxteis .....	B7
Figura B21. Cargas de DQO acumuladas nos leitos com meio drenante constituído por areia e mantas geotêxteis.....	B7
Figura B22. Concentração de cor nos percolados nos leitos com meio drenante constituído por areia e mantas geotêxteis.....	B8
Figura B23. Concentração de turbidez nos percolados nos leitos com meio drenante constituído por areia e mantas geotêxteis .....	B8
Figura B24. Variação do pH nos percolados nos leitos com meio drenante constituído por areia e mantas geotêxteis.....	B8

**LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS**

**CAPES** – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

**DBO** – Demanda bioquímica de oxigênio

**DMAE** – Departamento Municipal de Água e Esgotos

**DQO** – Demanda química de oxigênio

**ETA** – Estação de tratamento de Água

**ETE** - Estação de tratamento de Esgoto

**IPH** – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

**OP-20** – Manta geotêxtil do tipo OP-20

**OP-30** – Manta geotêxtil do tipo OP-30

**OP-40** – Manta geotêxtil do tipo OP-40

**OP-60** – Manta geotêxtil do tipo OP-60

**pH** – Potencial Hidrogeniônico

**RS** – Rio Grande do Sul

**UFRGS** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**UNT** – Unidade nefelométrica de turbidez

**V** - Volume

**XT-4** – Manta geotêxtil do tipo XT-4

## 1. INTRODUÇÃO

A situação atual do Rio Grande do Sul relativamente ao tratamento e disposição final do lodos produzidos nas estações de tratamento de água, é semelhante a de todos os Estados do Brasil, não havendo uma preocupação maior com relação à disposição deste tipo de efluente, que vem sendo lançado de maneira geral nos cursos de água, sem tratamento e/ou condicionamento prévio.

O aumento da demanda de água, tanto para consumo humano quanto para a indústria, leva a um consumo cada vez maior de produtos químicos nos processos de clarificação e desinfecção, aumentando sua participação no volume de resíduos gerados nas estações de tratamento. Quando lançados nos mananciais, impactando principalmente camada bentônica (efeito determinado pelo lodo, ao sedimentar), esses resíduos determinam repercussões negativas que se somam àquelas decorrentes da chegada aos receptores, dos dejetos líquidos e sólidos domésticos e industriais. Resultam por isso, e cada vez mais, danos ao meio ambiente e às populações que se suprem de água dessas fontes ou com elas mantêm um contato direto.

As causas das atitudes de negligência com o destino final dos lodos de ETAs são várias. Por exemplo, o seu descarte intermitente, a espaços de tempo relativamente longos, passa a falsa idéia de que os volumes gerados não o são em quantidades preocupantes. Ao mesmo tempo, a sua baixa concentração de matéria orgânica biodegradável, sugere baixo consumo de oxigênio (para satisfazer a DBO) quando são lançados em cursos de água, e induz à aceitação de que o potencial tóxico dos mesmos é pequeno. Há que se considerar, no entanto, a concentração de sólidos que esses lodos apresentam, aumentando a turbidez e a cor aparente das águas receptoras, exercendo assim influência na vida aquática; agravando o problema com as grandes concentrações do alumínio, de efeito e repercussão ambiental ainda não totalmente conhecidos.

Há leis de controle de emissão de resíduos específicos para diferentes fontes poluidoras, visando minimizar os danos que possam advir desses descartes. No caso de resíduos de estações de tratamento de água, onde se enquadram os lodos, não existe na atual legislação brasileira, uma sistemática de controle que estabeleça níveis de tratamento e condicionamento para posterior disposição final. Torna-se assim fundamental o estudo detalhado desse tipo de resíduo, para possibilitar a formulação de normas e procedimentos que venham contribuir para

a solução do problema.

Uma das principais preocupações com os lodos de ETAs é a carga de alumínio contida nos mesmos; apesar de não ser considerado um metal perigoso, tem sido referido como um dos prováveis precursores do mal de Alzheimer; além disso, alguns estudos mostram que o excesso de alumínio pode trazer prejuízo ao desenvolvimento de peixes e algas.

A Resolução CONAMA N° 20/86, que estabelece os teores máximos para substâncias julgadas potencialmente prejudiciais, inclui o alumínio. O limite de concentração permitido, que estabelece a classe da água, varia de 0,1mg/L a 1,5 mg/L. A lei estadual de emissão de efluentes líquidos da SSMA-Secretaria da Saúde e do Meio Ambiente do Rio grande do Sul, Portaria n° 05/89, fixa a concentração máxima de alumínio em 10 mg/L nos efluentes líquidos lançados nos cor aparentes de água direta ou indiretamente.

Há que se referir que poucos estudos foram desenvolvidos abordando lodos de ETAs; a consequência é a existência de poucos dados nacionais. A composição desse lodo varia muito de uma estação de tratamento para outra, ou na mesma estação, pois muitos são os fatores influenciam em sua constituição. Os testes e estudos realizados até o momento concentram-se na otimização das operações de desidratação, sem uma análise mais rigorosa da composição dos lodos secos e dos líquidos resultantes da secagem, seja ela mecânica ou natural.

É necessário o estudo aprofundado desse lodo, o que possibilitará a avaliação da melhor técnica a ser adotada para o seu tratamento e disposição final, com ampla segurança de que os padrões de emissão constantes da Resolução e Portaria citados anteriormente sejam atingidos, minimizando os eventuais efeitos provocados pelo seu descarte "in natura".

Visando trazer uma contribuição a mais para a solução do problema, nesta pesquisa observou-se o comportamento de lodo de ETA quando submetido à secagem natural em leitos de secagem, onde a camada drenante de diversas espessuras, foi constituído de areia de granulometria variável. Em seqüência, verifica-se a influência de regas dos lodos nos leitos, com líquidos acidificados (baixo pH), visando avaliar a possível solubilização do alumínio em meio ácido (a chuva ácida na Região Metropolitana de Porto Alegre é uma realidade). Em continuidade, analisou-se a eficiência de mantas filtrantes de várias <sup>GRAMATURAS</sup> espessuras na desidratação do lodo e na retenção do alumínio. Finalizando, realizou-se a disposição final do líquido

percolado dos leitos sobre composto orgânico, visando-se observar a contribuição das micelas coloidais orgânicas, adsortivas e quelantes, no “aprisionamento” do metal em estudo.

## 2. OBJETIVOS

A carência de dados nacionais a respeito do tratamento e disposição final do lodo de ETA, devida a quase inexistência de pesquisas nessa área, somada a tendência atual de conservação e proteção do meio ambiente, estão exigindo um gerenciamento adequado deste tipo de efluente, geralmente descartado diretamente no manancial de captação da água bruta para produção de água potável. Ao mesmo tempo, não há um conhecimento profundo do verdadeiro impacto causado pelo lançamento de lodos de ETAs em receptores, e sua repercussão ambiental. Esses aspectos embasam o desenvolvimento da presente pesquisa, na qual foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- avaliação do comportamento do lodo de ETA na operação de desidratação em leitos de secagem, com meio drenante/filtrante de diferentes espessuras de areia;
- avaliação da solubilização/lixiviação do alumínio de lodos dispostos em leitos de secagem, quando submetidos à chuvas ácidas, pela simulação da precipitação pluviométrica que já ocorre eventualmente na Região Metropolitana da Grande Porto Alegre (MILANO *et al.*, 1989);
- avaliação da influência na desidratação e na retenção de alumínio do lodo de ETA, de diferentes tipos de mantas filtrantes, quando utilizadas como elementos drenantes/filtrantes nos leitos de secagem;
- avaliação da influência de compostos orgânicos produzidos a partir da compostagem de resíduos urbanos, na atenuação do alumínio existente no filtrado/percolado de leitos de secagem destinados à desidratação de lodos de ETAs.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Composição e origem do lodo de ETA

##### 3.1.1. Origem do lodo

Os resíduos de uma estação de tratamento de água são lodos produzidos no processo de clarificação da água bruta para o abastecimento público, sendo acumulados nos decantadores ou posteriormente retidos dos filtros. Esses lodos, no momento da limpeza dos decantadores (manual ou mecanicamente) ou na lavagem do meio filtrante dos filtros, geralmente são dispostos de maneira inadequada no curso de água mais próximo da estação de tratamento de água.

A remoção do lodo dos decantadores pode ser feita manual (intermitente) ou mecanicamente (contínua), com acionamento automático ou dependente de operador. Quando a remoção é manual, o período de limpeza varia de 30 a 120 dias, dependendo da época do ano e das condições do manancial. As concentrações de sólidos no lodo apresentam grandes variações durante a descarga por gravidade, situando-se entre 0,2 e 2 %. Após a descarga, ainda restam bancos de lodo bastante concentrados (13 a 14 % de sólidos) no fundo do decantador, que normalmente são removidos com auxílio de jatos de água sob pressão (GRANDIN *et al.*, 1993).

Quando a remoção é mecanizada, através de bombeamento ou sifonamento, as concentrações de sólidos podem variar de 0,1 a 6 %, dependendo da frequência das descargas. Nos filtros, os sólidos são removidos por ocasião da lavagem dos meios filtrantes, feita geralmente a intervalos de 12 a 48 horas, durante 4 a 10 minutos, com fluxo em contra corrente que consome cerca de 1 a 5 % do volume de água tratada. As concentrações de sólidos variam de 0,01 a 0,1 %. Os sólidos presentes nessa água podem ser sedimentados e adensados, podendo atingir concentrações entre 1 e 2 % (GRANDIN *et al.*, 1993).

##### 3.1.2. Composição do lodo

A composição do lodo depende principalmente dos elementos contidos na água bruta a ser tratada. Possuem geralmente uma quantidade pequena de sólidos, de 3 a 15 g/L; sólidos

suspensos numa quantidade de 75 a 90 % dos sólidos totais, e uma porcentagem de sólidos voláteis em torno de 20 a 35 % dos sólidos totais. Os lodos são compostos por partes inorgânicas e normalmente não exercem demanda de oxigênio nas águas superficiais.

A  $DBO_5$ , normalmente de 30 a 100  $mg.O_2/L$ , e uma taxa de DQO em níveis de 500 a 10.000  $mg.O_2/L$ , demonstram ser esses lodos pouco biodegradáveis e facilmente oxidáveis. Sua composição varia de uma estação de tratamento para outra, mas suas características são relativamente semelhantes.

É um fluido não-newtoniano, volumoso, composto por substâncias gelatinosas de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas como argila ou areia, colóides coloridos, microrganismos incluindo plancton e outros materiais orgânicos e inorgânicos removidos da água bruta no processo de tratamento, incluindo também os produtos químicos utilizados no processo de tratamento de água, como o carvão ativado, polieletrólitos e cal, entre outros.

O pH varia no intervalo de 5,0 a 7,0. Além disso, o lodo é insolúvel em níveis de pH das águas naturais e facilmente sedimentável; porém, sua concentração de sólidos totais é inadequada para um manuseio convencional e subsequente disposição (a taxa de 20 % de sólidos totais é considerada como uma quantidade mínima para o manuseio do lodo), resiste a passagem da água pela sua massa e devido a sua composição, quando disposto no solo, poderá compactá-lo.

O lodo da lavagem de filtros possui algumas diferenças em relação aos lodos dos decantadores, por ser mais fluido e possuir uma grande quantidade de água, com  $DBO_5$  de 5  $mgO_2/L$  e com uma DQO de 160  $mgO_2/L$ ; seu total de sólido é de 0,4  $g/L$ , com 0,04 a 0,1  $mg/L$  de sólidos suspensos (ALBRECHT, 1972).

O volume de lodo produzido no processo de clarificação é geralmente de 1% ou menos do volume da água bruta. Com a ausência de poluição na água bruta, não ocorre aparente digestão anaeróbia desse lodo. As concentrações de organismos patogênicos são extremamente baixas, menos de 20 coliformes por grama de lodo, quando comparadas com  $10^3$  a  $10^6$  coliformes por grama de lodos de esgotos domésticos digeridos e secos (COMMITTEE REPORT - PARTE 2, 1978; ELLIOT & DEMPSEY, 1991).

Segundo KAWAMURA (1991), os lodos são tixotrópicos, ou seja, têm características gelatinosas quando em repouso e se tornam fluídos quando sofrem uma ação física. Além disso, são compressíveis e resistentes ao adensamento e a desidratação, especialmente aqueles gerados de águas brutas com baixa turbidez.

A natureza e a quantidade dos lodos gerados numa ETA depende, entre outros, dos seguintes fatores (GRANDIN *et al.*, 1993):

- sólidos em suspensão, turbidez e cor aparente da água bruta;
- dosagem de produtos químicos coagulantes e condicionantes como cal, sulfato de alumínio ou cloreto férrico, polieletrólitos catiônicos ou não iônicos e carvão ativado;
- frequência de remoção de lodo dos decantadores;
- frequência de lavagem dos filtros;
- modo de operação dos tanques de regularização de vazão.

A tabela 3.1 relaciona as principais características observadas em 95 % das amostras de lodos coletadas de estações de tratamento de água que utilizam o processo de coagulação química na clarificação da água bruta.

Tabela 3.1 - Principais características de dois tipos de lodo produzidos com coagulação química

Parâmetros	Lodo de hidróxido de alumínio	Lodo de hidróxido de ferro
Al (% peso seco)	21,2 (2,8 – 30)	1,6 ; 7,7
Ca (% peso seco)	2,7 (0,3 – 5,0)	15,0
Fe (% peso seco)	3,2 (1,2 – 6,6)	10,9
K (% peso seco)	1,7 (0,04 – 5)	0,3
Mg (% peso seco)	0,45 (0,24 – 0,8)	1,6
S (% peso seco)	20	-
P (% peso seco)	0,35	0,36
pH	7,0 (5,1 – 8,0)	7,3 ; 9
Carbono orgânico total (% peso seco)	3,1 (0,85 – 6,5)	3,1 (0,85 – 6,5)
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	45 (2 - 104)	-
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	500 (100 – 10.000)	-
Nitrogênio total de Kjeldahl (% peso seco)	0,68 (0,44 – 1,0)	0,37 (0,05 – 0,55)
Carbonato de cálcio equivalente (%)	15 ( 10 - 20 )	20 (10 – 53)
Coliformes (número mais provável/g)	<20	<20

Fonte: ELLIOT & DEMPSEY (1991). A taxa de variação dos parâmetros está entre parênteses, quando foi obtido mais de um valor no parâmetro analisado, encontrando-se fora de parênteses a média dos valores encontrados.

As altas concentrações de alumínio (2.800 a 30.000 mg/kg) contidas no lodo, possibilita uma forte capacidade de ligação com o fósforo, enquanto a quantidade de metais pesados pode ser limitada devido ao controle de pureza dos coagulantes químicos. O mesmo ocorre com compostos orgânicos tóxicos que são reduzidos, salvo em casos de contaminação da água bruta. A tabela 3.2 apresenta os dados obtidos quando foram avaliadas as quantidades de seis metais pesados contidos no lodo produzido em sete estações de tratamento de água nos Estados Unidos, cujo processo de tratamento da água era o convencional, e onde era utilizado como coagulante químico, o sulfato de alumínio. Os metais avaliados são normalmente monitorados nas áreas de disposição de lodos. Além disso o lodo de ETA geralmente continha baixo valor fertilizante, com uma taxa de matéria orgânica de 25 a 35 % (ELLIOTT & DEMPSEY, 1991).

Tabela 3. 2 - Concentração de metais pesados em lodos de ETAs e no solo

Metais	Lodo de ETA		Solo		Máximo permitido(2) (mg/kg)
	Variação (mg/kg)	Media(1) (mg/kg)	Variação (mg/kg)	Típico (mg/kg)	
Cd	< 0,12	1	0,01-0,7	0,05	25
Cu	135 - 485	234	2 - 100	30	1.000
Cr	40 - 513	187	1 - 1000	100	1.000
Ni	26 - 218	102	5 - 5000	40	200
Pb	18 - 840	230	2 - 200	10	1.000
Zn	195 - 865	557	10 - 300	50	2.500

Fonte: ELLIOTT & DEMPSEY (1991)

(1) Média de oito amostras de lodo analisadas;

(2) Quantidade máxima permitida de metais em lodos para sua utilização em áreas de produção agrícola.

A quantidade e a qualidade dos lodos gerados numa ETA dependem das características da água bruta, produtos químicos e das unidades utilizadas no processo de tratamento, como também do método de operação. Por isso, não se tem o controle da composição do lodo produzido. Assim, segundo ELLIOTT & DEMPSEY (1991), a variável principal na produção do lodo é a adição dos produtos químicos no processo de tratamento, podendo ser realizadas as seguintes alterações visando diminuir a sua produção:

- reduzir a adição de produtos químicos;
- mudar os tipos de coagulantes ou uso de auxiliares na coagulação, com utilização de coagulantes conservativos;
- recuperação do alumínio;
- mudar o processo de tratamento pela filtração direta.
- aplicação do lodo na coagulação ( estudo)

A característica gelatinosa do lodo o torna mais sensível ao processo de desidratação do que lodos de estações de tratamento de esgoto. Acredita-se ser devido a forma de ligação entre as moléculas de água e o hidróxido de alumínio (NICHOLSON & GOLDBACH, 1991).

No estudo de caso da ETA do tipo convencional do Sistema Rio das Velhas (MG), com o objetivo de quantificar e qualificar os efluentes gerados para o futuro dimensionamento das unidades de tratamento do lodo produzido, verificou-se que o volume gerado representava percentuais que variavam de 1,83 % a 3,8 % da água bruta tratada, condizentes com os dados internacionais; 25 a 88 % do lodo produzido era composto pelo lodo da lavagem dos filtros, enquanto o lodo dos decantadores representava entre 12 a 75 %. Somente em condições de operação com água de boa qualidade as proporções se aproximavam dos padrões internacionais (CASTRO *et al.*, 1997)

Lodos oriundos do tratamento de águas superficiais com elevado teor de sólidos suspensos (materiais mineralizados) são mais fáceis de desidratar do que os ricos em matéria orgânica; isto se deve provavelmente presença abundante de precipitados gelatinosos (hidróxidos de alumínio hidratados) e também da capacidade que o hidróxido de alumínio tem em adsorver água em sua superfície (solvatação) (GONÇALVES *et al.*, 1997).

### 3.1.3. Alumínio

Durante uma reação química, processa-se uma relação de afinidade de vários íons com o alumínio, conforme mostrado abaixo ( DIAMADOPOULOS & BENEDEK, 1984):



O hidróxido de alumínio formado no processo de coagulação no sistema de tratamento de água, influencia na taxa de sedimentação dos sólidos, na quantidade de sólidos suspensos no sobrenadante e na filtrabilidade do lodo. O tempo de duração das reações químicas afeta o tamanho e mudam as espécies poliméricas de alumínio no floco de lodo. Resultados de testes de filtrabilidade de lodos com a adição de diferentes tipos de coagulantes com alumínio, demonstraram que o pH causa um efeito marcante na resistência específica do lodo. Nas amostras nas quais não foram utilizados coagulantes, verificou-se que quanto menor o pH menor a resistência específica, ou seja, em pH = 10 a resistência específica era seis vezes maior do que com pH = 4,0. No caso do uso de diferentes tipos de coagulantes no processo de tratamento água, o alumínio, cloretos de alumínio e PBAC, a resistência específica do lodo também sofreu influência do pH. Com o uso do cloreto de alumínio e PBAC ( polímero básico de cloreto de alumínio), o lodo apresentou máxima resistência específica entre pH 5,0 e 5,5, enquanto a mínima resistência em pH = 8,0; em valores elevados de pH ocor aparenteriam incrementos na resistência específica (DIAMADOPOULOS & BENEBEK, 1984).

Em soluções ácidas, o alumínio existe na forma de íon  $Al^{+3}$  hidrolisado aquoso; abaixo de pH = 4,0, o alumínio hidrolisa para formas de espécies monoméricas e espécies polinucleares, podendo estar fortemente complexado com fluoretos e carbono orgânico dissolvido ou complexado fracamente com sulfetos. O alumínio pode precipitar-se como hidróxido, com fosfatos, em fase sólida (aluminorgânico) ou como uma mistura de sais. Nas águas tratadas, muitas partículas de alumínio são precipitadas em formas amorfas que são mais suscetíveis a resolubilização que o alumínio das partículas minerais encontradas na água natural (VAN BENSCHOTEN & EDZWALD, 1990).

Os principais ligantes com o alumínio nas águas naturais são elementos como fluor e substâncias húmicas em forma coloidal (moléculas orgânicas). Essas substâncias ligadas a alumínio são facilmente removidas no processo convencional de tratamento de água. Interações do alumínio com o cálcio podem reduzir sua solubilização, e em circunstâncias neutras ou básicas, na presença de sílica, fica reduzido o potencial tóxico do alumínio (REITER *et al.*, 1995, GEORGE *et al.*, 1995).

Os compostos de alumínio podem ser divididos em quatro espécies distintas (GEORGE *et al.*, 1995):

- a) alumínio total;
- b) alumínio monomérico (orgânico e inorgânico);
- c) cátion de alumínio ligante (alumínio livre);
- d) cátion de alumínio não ligante.
- e) formas hidrolisadas

O alumínio monomérico presente nas águas naturais encontra-se principalmente nas formas de alumínio não ligante, isto é, associado com compostos orgânicos ou em espécies de alumínio aniônico.

Em geral, não é possível analiticamente determinar espécies individuais de alumínio. Somente grupos de espécies podem ser isoladas, como indicado no esquema seguinte:

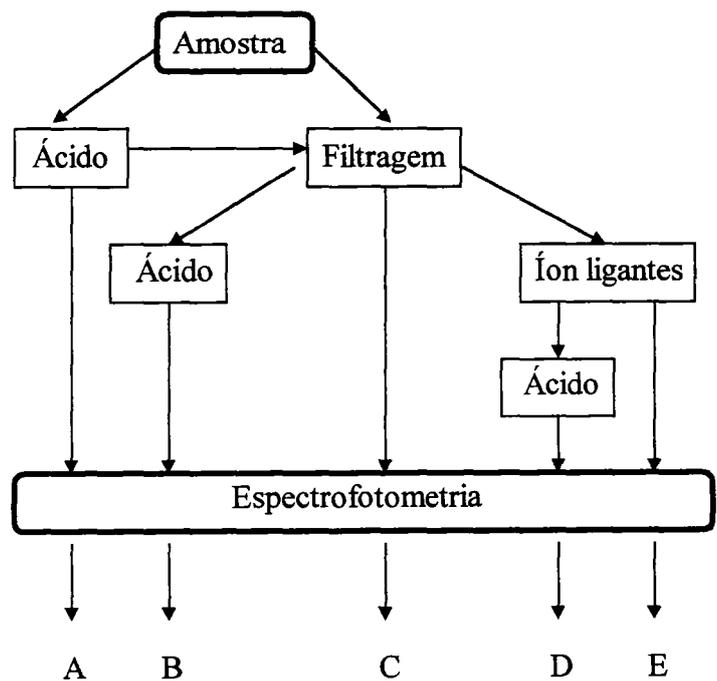


Figura 3.1 - Processo de fracionamento do alumínio (Fonte:VAN BENSCHOTEN & EDZWALD, 1990)

Legenda:

- A = alumínio total;
- B = alumínio total dissolvido;
- C = alumínio dissolvido monomérico;
- D = alumínio orgânico dissolvido;
- E = alumínio dissolvido orgânico monomérico.

A partir da determinação das frações dos compostos de alumínio, obtém-se as seguintes relações:

A - B = alumínio particulado;

B - C = alumínio polimérico coloidal, fortemente ligado;

B - D = alumínio inorgânico dissolvido;

C - E = alumínio dissolvido inorgânico monomérico.

### 3.1.3.1. O alumínio e os seres vivos

O alumínio é um dos metais mais abundantes na crosta terrestre, superado somente pelos elementos oxigênio e sílica em concentração total. A toxicidade do alumínio está relacionada com sua solubilidade e não com sua quantidade (ELLIOT & DEMPSEY, 1991).

O alumínio é um composto neurotóxico. A sua acumulação a longo prazo no sistema circulatório, uma situação freqüentemente sofrida pelos pacientes de hemodialise, podem resultar em sérias encefalopatias, terminando em demências. As principais fontes de alumínio para os seres humanos são os alimentos e o fosfato de alumínio utilizado como estabilizador do pH do solo, podendo ser transmitido ao organismo humano através das frutas e vegetais que não são limpos adequadamente. A carga média diária americana de alumínio por pessoa é de 20 mg/dia, sendo que 99 % são excretados nas fezes, menos que 0,1 % pela urina e o restante absorvido é complexado com outros compostos (REITER *et al.*, 1995).

REITER *et al.* (1995) cita estudos realizados com a aplicação de alumínio no cérebro de animais, resultando na formação de depósitos de proteína amilóide e nós neurofibrilares (“*neurofibrillary tangles*”) possuidores de uma forma similar, mas não idênticos àqueles formados em seres humanos atingidos pelo mal de Alzheimer. Por isso tem sido postulado que o alumínio pode ser o fator etiológico do mal de Alzheimer (um tipo de demência). Assim, vários estudos tem sido feitos, mas com resultados contraditórios, de maneira que não existe uma conclusão definitiva da relação do alumínio e o mal de Alzheimer. Não é conhecido o papel do alumínio na biologia humana. Acredita-se que o corpo humano não armazena alumínio, e sua concentração é extremamente baixa, da ordem de microgramas por grama de peso seco; entretanto, elevadas concentrações são normalmente encontradas nos pulmões e nos tecidos ósseos.

Vários estudos foram citados por CORDEIRO (1993), relatando as mudanças bruscas nas condições físicas dos peixes quando eram dispostos em ambientes com elevadas cargas de alumínio, e também nas comunidades macro bentônicas, que sofrem variações em sua estrutura, distribuição, abundância e diversidade. Esses estudos concluíram que as formas inorgânicas parecem ser as espécies de maior significância na toxicidade.

O lançamento de lodos de ETA nos córregos tem como efeito mais perceptível a formação de bancos de lodo, principalmente em locais em que a velocidade da água é baixa. Em consequência, esses resíduos cobrem os organismos bentônicos que servem como alimento para os peixes. O aumento da cor aparente e turbidez podem causar mudanças químicas e biológicas na água pela diminuição da penetração da luz, afetando a atividade fotossintética (AWWA, 1971).

A preocupação com a disposição do líquido drenado do lodo de ETA pode ser justificada através dos testes toxicológicos realizados em lixiviados de lodo de ETA obtidos em diferentes pH, no estudo conduzido por GEORGE *et al.* (1995). Lodos de dez Estações de Tratamento de Água dos Estados Unidos foram submetidos a testes toxicológicos, que incluíram o teste de crescimento de *S. capricornus* aparentenutum, teste de crescimento e sobrevivência do *Fathead minnow* (ambos teste de toxicidade crônica); teste de mortalidade de protozoários *Tetrahymena pyriformes* e da bactéria *Photobacterium phosphoreum* (ambos teste de toxicidade aguda). Todas as estações de tratamento descartavam seus resíduos nos cursos de água mais próximos. Nove estações operavam com tratamento convencional - coagulação, floculação, sedimentação seguidos pela filtração e desinfecção e uma estação de abrandamento com cal. A frequência da retirada do lodo dos decantadores variava de uma vez por ano a continuamente, dependendo da Estação de Tratamento. O total de sólidos suspensos nas amostras de lodo variavam de 115 mg/L a 50.500 mg/L. O total de alumínio variou de 12 mg/L a 2.900 mg/L, dependendo da Estação. As amostras de lodo de cada Estação de Tratamento eram divididas em três alíquotas, ajustando-se o pH em 5,0, 7,0 e 9,0, respectivamente. Após o ajuste do pH do lodo nas três diferentes faixas, o lodo era deixado em um misturador mecânico por 24 horas; após esse período, o lodo era filtrado. Com o filtrado, realizava-se novamente o ajuste do pH, para os seus cor aparentes respondentes pH de extração. A quantidade de filtrado misturado na água do cor aparente receptor (curso de água onde o lodo era descartado) utilizada nos testes de toxicidade foi de 12,5, 25, 50 e 100 % para cada nível de pH. O pH das amostras de águas dos cor aparentes receptores utilizadas nos testes

também eram ajustados nos mesmos níveis de pH de extração dos filtrados.

As conclusões obtidas foram as seguintes:

- as condições químicas do lixiviado do lodo de ETA pode adversamente produzir um impacto primário quando descartado em águas superficiais;
- a alga *S capricor aparentenutum* era mais sensível aos extratos de lodo que as bactérias, os protozoários e aos *fatheat minnow*;
- a inibição do crescimento das algas variou em função das características do lodo e da química da água de recebimento;
- extratos de lodo com pH = 5,0 inibiram o crescimento das algas, fenômeno que não foi atribuído somente ao “stress” pela acidez, mas também à presença de outro íon, possivelmente pelo alumínio, que sozinho ou combinado com o ácido causou a inibição;
- extratos de lodo obtidos usando água de recebimento com dureza menor ou igual a 35 mg/L, inibiram o crescimento das algas para todos os níveis de pH;
- resíduos de lodo de ETA em ambientes aquáticos neutros apresentaram um risco mínimo para as algas;
- cinco dos oito lodos testados não inibiram o crescimento dos seres em condições básicas;
- em geral, a inibição do crescimento aparente dos seres vivos utilizados nos testes não foi proporcional à concentração de alumínio no extrato de lodo que era composto principalmente de alumínio monômero.

CORDEIRO (1993), observou as mudanças ocor aparenteridas no córrego do Monjolinho, na Cidade de São Carlos (SP), próximo a uma estação de tratamento de água, que descartavam a cada 50 dias, após a lavagem dos decantadores, um volume de lodo em torno de 1638 m<sup>3</sup>. Através das observações do impacto ambiental causado pelo descarte desse lodo no córrego, concluiu que esse resíduo pode ser considerado como poluente por infringir as leis da Resolução CONAMA N° 20/86 quanto aos seguintes parâmetros: sólidos sedimentáveis, ferro, cobre, chumbo, manganês e níquel.

### 3.2. Métodos de desidratação

Os principais métodos utilizados para desidratação dos lodos de ETAs são divididos em dois grupos distintos, de acordo com a operação de desidratação utilizada. Esta operação

poderá ser realizada através da secagem natural ou pela desidratação mecânica.

As técnicas que identificam cada operação são:

a) Sistemas de secagem natural:

- leitos de secagem: com areia (convencional) e/ou com fundo pavimentado;
- lagoas de secagem;
- leitos e lagoas de congelamento;

b) Sistemas de desidratação mecânica:

- centrífugas;
- filtros a vácuo;
- filtros prensa de placas;
- filtros prensa de esteiras (“Belt Press”);
- leitos de secagem a vácuo.

### 3.2.1. Aspectos gerais dos métodos de desidratação

CULP *et al.* (1978) apresenta uma breve descrição dos procedimentos básicos a serem realizados nos diferentes sistemas disponíveis para o processo de desidratação:

- lagoas normalmente recebem o lodo diretamente sem pré-tratamento ou outro condicionante (polieletrólitos). Os sólidos removidos das lagoas são adequados para desidratação a quente ou incineração, e são dispostos diretamente no solo ou em aterros sanitários;
- leitos de secagem recebem o lodo previamente adensado e sua desidratação é feita pelo processo de drenagem e evaporação da água da massa de lodo. Esses lodos não são adequados para incineração, e normalmente são dispostos no solo ou em aterros sanitários;
- nos processos mecânicos tais como filtro prensa, filtro a vácuo, centrífugas entre outros, o lodo sofre um pré-tratamento com a utilização de condicionantes químicos e adensamento. O lodo desidratado pode ser disposto no solo, aterro sanitário ou ser encaminhado para incineração.

### 3.2.2. Acondicionamento de lodo

O acondicionamento de lodo para posterior tratamento pode ser realizado por métodos físicos ou químicos. Métodos físicos podem ser naturais ou artificiais, como o congelamento, descongelamento e o tratamento a quente. Os condicionantes químicos são bastante utilizados, principalmente com o uso de polímeros (catiônicos, aniônicos ou não iônicos), produtos inorgânicos básicos ou ácidos. A cal é um dos condicionantes mais utilizados, devido a sua capacidade em aglomerar as partículas finas, formando uma massa com porosidade razoável, que permite a fácil passagem da água, e rápida desidratação. Os condicionantes como cal, cloreto férrico e cinza tornam as tortas de lodo seco mais rígidas e aumentam o peso específico das partículas. (FULTON, 1974)

Estudos realizados por GRANDIN *et al.* (1993), com diferentes tipos de condicionantes químicos, mostraram que a utilização de dosagens ótimas dos polieletrólitos em torno de 0,5 a 5 g/kg de sólidos secos em lodos previamente adensados submetidos à desidratação, apresentaram que os melhores resultados são obtidos com polieletrólitos aniônicos 7172 e 7174 da Nalco, comparativamente aos não iônicos 7181 da Nalco e Superfloc N1906 da Cyanamid, nas condições de teste empregadas.

Estudos realizados com o uso de serragem de madeira como condicionante de lodo de ETA, objetivando verificar a eficiência da desidratação mecânica com o uso de filtros prensas e filtros a vácuo em escala piloto, com a adição de um quantidade 15 g de serragem para cada 500 ml de lodo de ETA, mostraram excelentes resultados, conseguindo-se uma remoção de 80 % da água contida na massa de lodo, com a aplicação de pressões positivas de 0,6 MPa e 0,8 MPa. Nos ensaios com a aplicação de pressões negativas (filtração a vácuo) em apenas 5 min de filtragem, essa taxa de remoção já tinha sido atingida, resultando numa eficiência com a utilização da serragem de 2,5 vezes maior quando comparado com lodos não condicionados (CORDEIRO, 1993).

### 3.2.3. Secagem natural

A construção do leito de secagem é realizada com pouco investimento; no entanto, as atividades de remoção e reposição de lodo nos leitos, exigindo da mão-de-obra e equipamentos específicos, demandam custos elevados. A secagem do lodo depende muito das

condições climáticas, que podem prejudicar o processo de desidratação. Os sólidos contidos no lodo podem penetrar no leito de areia, sendo necessária a remoção de uma certa espessura do leito drenante, geralmente de areia, onerando essa técnica de tratamento; o uso de polímeros minimiza esse problema (BISHOP, 1978).

Estudo realizado por CORDEIRO (1993) em leitos de secagem em escala piloto, mostrou uma penetração extremamente pequena dos sólidos do lodo no meio drenante de 10 cm de areia com granulometria de 0,3 a 0,5 mm; mesmo sem a utilização de polímeros, a penetração dos sólidos no leito foi de apenas 10 mm.

As taxas de drenagem por gravidade variam muito com a natureza do lodo e da quantidade de acondicionante químico usado. Para lodos dispostos em leito de secagem com baixa resistência específica, a drenagem pode ser satisfatória com uma camada de lodo de 0,6 a 0,9 m e para lodo de difícil drenagem são recomendadas espessuras máximas de 0,3 m, no caso de não serem utilizados condicionantes químicos. Esse método é muito útil onde existe área disponível e o lodo for de difícil desidratação por meio mecânico sem condicionamento químico (COMMITTEE REPORT –PARTE 2, 1978).

A estação de tratamento de água de Toyono, na cidade de Osaka (Japão), utiliza 33 leitos de secagem com 1.410 m<sup>2</sup> cada um e com uma profundidade útil variando de 0,5 a 0,8 m. O lodo adensado é colocado nos leitos, ficando nos mesmos por um período de um ano. São conseguidas concentrações de sólidos de 36 a 50 % na torta de lodo seco, independentemente da chuva média por ano de 1450 mm/ano. A carga de lodo é de 98 a 120 kg/m<sup>2</sup> de leito de secagem, com uma média de 110 kg/m<sup>2</sup>. A alta taxa de sólidos no lodo seco é possível devido à elevada carga de lodo, à pequena profundidade dos leitos de secagem e ao longo período de permanência do lodo nos leitos. Em operações normais, a profundidade da camada de lodo é de 1,3 m, com ciclo de secagem de 4 a 5 meses, para uma carga de lodo de 40 a 80 kg/m<sup>2</sup>. Todo o lodo produzido nessa estação de tratamento é utilizado como matéria prima nas fábricas de cimento (KAWAMURA & TRUSSELL, 1991).

O tempo de permanência do lodo nos leitos pode ser reduzido significativamente com a aplicação da técnica de aeração, durante as três primeiras semanas do ciclo de secagem ou até o aparecimento de uma crosta na superfície do lodo. Podem ser utilizados tanto o ar comprimido quanto o vácuo para acelerar o processo de desidratação do lodo nos leitos de

secagem. Uma desvantagem na utilização dessa técnica é a obstrução dos dispositivos de aplicação da aeração (KAWAMURA, 1991)

Em países de clima frio, está sendo desenvolvida em escala piloto a técnica de congelamento em leitos. Nesse sistema, as formas finas suspensas do lodo são convertidas em partículas granulares que são semelhantes aos grãos de café e não se quebram mesmo com agitação intensa. Com a operação de congelamento e posterior drenagem do líquido resultante do descongelamento, pode-se obter uma redução de até 96 % do volume de lodo. Os mesmos testes realizados em colunas, demonstraram que o lodo pode ser acumulado no leito por vários anos, até que se imponha a sua remoção (MARTEL & DIENER, 1991).

Tendo como objetivo principal observar a desidratação de lodo em leitos de secagem submetidos à aplicação de diferentes lâminas líquidas de lodo bruto - 10 , 15, 20 e 25 cm - sobre o meio drenante, sem o uso de condicionantes químicos, CORDEIRO (1993) realizou ensaios em leitos de secagem, em escala piloto. Esses leitos foram constituídos por tubos de acrílico de 150 mm de diâmetro e 500 mm de altura, e camada drenante de areia de 100mm de espessura com granulometria variando de 0,3 a 0,5mm. O tempo de desidratação foi completado no momento em que praticamente toda a parcela de água estivesse removida por drenagem e por evaporação. O experimento foi colocado ao tempo mas protegido das precipitações. A remoção de água foi muito rápida, em torno de 6 horas no leito em que foram dispostas lâminas de lodo com espessuras iguais a 100 mm, diminuindo com o aumento da espessura de lodo sobre o meio drenante. Os leitos de secagem com espessuras maiores de lodo apresentaram uma drenagem mais efetiva. O comprometimento do meio drenante de areia foi mínimo, independentemente da espessura de lodo aplicada sobre os leitos de secagem. Foi observada uma eficiência excelente do sistema de drenagem dos leitos de secagem, remoção de metais e qualidade do líquido drenado da massa de lodo.

O uso de lagoas para secagem de lodo, somente é possível no caso em que se tenha áreas disponíveis. As lagoas podem ser usadas também como unidades de armazenamento temporário, para adensamento e futura disposição. A concentração máxima obtida de sólidos na torta de lodo em lagoas é de 10 %. As taxas de drenagem por gravidade variam dramaticamente com a natureza do lodo e da quantidade de condicionante químico usado (COMMITTEE - PARTE 2, 1978).

### 3.2.4. Desidratação mecânica

Diferentes equipamentos mecânicos podem ser utilizados na operação de desidratação de lodo de ETAs; a escolha entre estes depende das condições existentes no local, os custos de implantação e operação, além da umidade final da massa de lodo a ser atingida.

A eficiência de centrífugas varia com as características do lodo. O filtro prensa tem sido usado com muito sucesso na desidratação de lodos de ETAs. Em filtros prensas de esteiras, é possível conseguir uma concentração da torta de lodo seco em torno de 15 % de sólidos, com dosagens de 50 a 100 mg/L de polímeros, e se pode capturar 90 a 95 % dos sólidos. É difícil a desidratação de lodo com grandes quantidades de hidróxido de alumínio, quando se usa a filtração a vácuo; no entanto, com grandes quantidades de sólidos e condicionantes químicos, pode-se obter uma concentração na torta de lodo de 20 % (BISHOP, 1978).

No Japão, o filtro prensa é extremamente utilizado para a desidratação do lodo e em muitas situações sem pré-tratamento químico. Esses filtros prensa são capazes de produzir 40 a 50 % de sólidos no lodo seco, resultando uma carga média de 3 kg de lodo seco por metro quadrado de filtro. As estações construídas depois do ano de 1975 geralmente não utilizam o pré-tratamento químico (polímero ou cal) para o processo mecanizado de desidratação, pois no Japão é proibido o uso de polieletrólitos orgânicos sintéticos com alto peso molecular no tratamento de água; caso seja usado no processo de desidratação do lodo, o sobrenadante não poderá retornar ao sistema de tratamento da água (KAWAMURA & TRUSSELL, 1991).

No Estado do Colorado (EUA), foram avaliados em detalhes quatro sistemas de desidratação de lodo de ETA: filtro prensa de esteiras, filtro a vácuo, leitos de secagem, sistemas de leitos com meio filtrante plástico. O filtro prensa de esteiras foi o que apresentou o melhor desempenho. O lodo era retirado do decantador duas vezes ao ano, sendo descartado em um curso de água próximo. A uma taxa média de alimentação do filtro prensa de 3,8 L/s, com uma concentração média de 3,1 % de sólidos, foi obtida na torta de lodo uma taxa média de 18,7 % de sólidos secos, o que representou 98 % de sólidos do lodo retidos. A taxa de polímero usada era de 1,8 a 3,4 kg/t de sólidos secos, dependendo das características do lodo. Na operação do filtro prensa de esteira observou-se que a dosagem de polímero também é importante para a obtenção de uma desidratação eficiente. Em lodos novos foram necessários mais polímeros que em lodos velhos. Quando os lodos eram coletados em tempos diferentes,

mesmo com concentrações de sólidos iguais, foram necessárias diferentes dosagens de polímeros (NICHOLSON & GOLDBACH, 1991).

GRANDIN *et al.* (1993), realizaram estudo com lodo da Estação de Tratamento de Água do Guaraú (SP), com a finalidade de avaliar o comportamento deste quanto ao adensamento e ao condicionamento com produtos químicos, na operação de desidratação. Primeiramente foi realizado o teste de adensamento por gravidade, sem condicionantes químicos, tendo sido obtidas as concentrações de sólidos de 5 % para lodos do decantador, 1,9 % para lodos da lavagem dos filtros e 3,4 % de sólidos para a mistura de ambos em proporções iguais. Além disso, foi avaliada a influência da idade do lodo nos diferentes parâmetros analisados, verificando-se que em lodos armazenados por mais de uma semana, a filtrabilidade diminuía consideravelmente para ambos os tipos de lodo, mas com maior intensidade nos lodos produzidos nos decantadores, com o aumento da resistência específica em até três vezes. Com a utilização de polieletrólitos, a filtrabilidade do lodo aumentou de quatro a dezesseis vezes. O polieletrólito do tipo aniônico apresentou os melhores resultados nas condições de testes empregadas. Um fato importante observado foi que os teores de sólidos nas tortas de lodo dos decantadores e da água de lavagem dos filtros foram mais elevadas sem a aplicação de polieletrólitos, indicando que o aumento da filtrabilidade aparentemente não está relacionada com a eficiência da desidratação, sob as condições de ensaio no funil de Buchner. O lodo da água de lavagem de filtro apresentou uma resistência específica maior do que os lodos dos decantadores (GRANDIN *et al.*, 1993).

JHONSON *et al.* (1992), observaram o desempenho de filtro prensa de esteiras com a realização de diferentes testes, visando otimizar o processo. Avaliaram a influência de parâmetros tais como concentração de sólidos na alimentação, taxa do fluxo de lodo, dosagem de polímeros, velocidade e pressão a ser aplicada nas esteiras. A medida do desempenho foi baseada na produção de torta de lodo por tempo e na concentração de sólidos da mesma. Verificou-se que a porcentagem de sólidos do lodo é o parâmetro mais crítico no desempenho do filtro prensa de esteiras, na otimização da produção de lodo seco. O teste demonstrou que a porcentagem de sólidos na torta, embora constante, não é um fator crítico na determinação da quantidade de sólidos na alimentação do filtro prensa de esteira, pois a produção é o fator dominante.

Em muitos casos, é necessária a combinação de operações e processos para otimizar a desidratação de lodos de ETAs, a fim de aumentar a concentração de sólidos e minimizar os custos, principalmente com a diminuição do volume para a disposição final.

Um caso interessante ocorreu aparentemente na estação de tratamento de Kashiwai, na cidade de Shiba (Japão), onde são tratados 21 m<sup>3</sup>/s de água. O lodo é de difícil secagem, sendo necessárias como coadjuvantes as operações de congelamento-descongelamento. A desidratação do lodo é efetuada da seguinte maneira: primeiro o lodo é adensado por gravidade e então centrifugado (9 centrífugas), para futuro congelamento; a seguir, o lodo é congelado (25 congeladores). Após o descongelamento e drenagem do sobrenadante, o lodo passa para a operação de secagem, com o uso de filtros prensas de esteiras, resultando uma concentração de sólidos na torta de lodo seca de 40 a 45 %. O lodo seco é vendido para agricultores, a um preço razoável, para ser utilizado como condicionante de solo (KAWAMURA & TRUSSELL, 1991).

### **3.2.5. Vantagens e desvantagens dos métodos de desidratação**

Tanto os sistemas naturais quanto mecanizados de desidratação possuem suas vantagens e desvantagens (tabela 3.3), sendo necessária para a escolha de um ou outro a avaliação de diferentes aspectos:

- características do lodo;
- área disponível para disposição;
- custo de implantação, operação e de manutenção;
- facilidade de operação;
- estado final desejado para o lodo;
- riscos ao meio ambiente;
- consumo de produtos químicos.

Tabela 3.3 - Vantagens e desvantagens entre os dois sistemas de desidratação:

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Secagem natural	Viabilidade econômica de implantação (área disponível e de baixo custo), consumo baixo de energia e de produtos químicos, baixa sensibilidade às variações qualitativa e quantitativa do lodo e a simplicidade de operação	Mão-de-obra intensiva para remoção do lodo, visibilidade à população, possibilidade de geração de odores, riscos de contaminação do lençol freático e águas superficiais, dependência das condições climáticas e falta de critérios racionais de projeto
Desidratação mecânica	Necessita de menor área de implantação, independência das condições climáticas e a minimização de certos impactos ambientais	Maior consumo de energia, uso de produtos químicos, alta sensibilidade as variações qualitativa e quantitativa do lodo, necessidade de trocas e lavagem do meio de filtragem, problemas com ruído e vibrações excessivas provocados por bombas e motores

Fonte: GRANDIN *et al.* (1993)

Muitas são as alternativas para a desidratação do lodo de ETA, com suas vantagens e desvantagens. A escolha de uma dessas alternativas será função das condições existentes na estação de tratamento, das características do lodo produzido nas mesmas e da disposição final desse resíduo. Visto que cada estação de tratamento possui um lodo com suas características próprias, apenas apresentam certa semelhança em suas propriedades, por exemplo, sua difícil desidratação (LUCAS *et al.*, 1994).

A tabela 3.4 apresenta as concentrações máximas de sólidos possíveis de serem obtidas na massa de lodos desidratadas, com o uso dos diferentes métodos de desidratação disponíveis.

Tabela 3.4 - Quantidades de sólidos (%) na torta de lodo desidratado obtidas através de diversos métodos de desidratação

Método de desidratação	Lodo de ETA	Lodo de estações de abrandamento
Adensamento por gravidade	2 - 5	8 - 12
Leitos de secagem	30 - 50	40 - 60
Centrífugas	10 - 25	30 - 70
Filtros prensas	25 - 50	40 - 50
Filtros prensas de esteira	20 - 25	-
Congelamento	25 - 30	-

Fonte: KAWAMURA (1991)

Estudos demonstram a importância em se realizar a separação dos efluentes da lavagem dos filtros e dos decantadores, no momento de projetar as unidades de tratamento do lodo, devido a elevada variação na qualidade dos efluentes, da grande diferença entre volume a serem descartados e as frequências nas descargas. O reaproveitamento da água de lavagem dos filtros da Eta - Rio Descoberto (DF), demonstraram nos primeiros quatro meses de operação do sistema, que o retorno do sobrenadante dos adensadores à estação não comprometiam o desempenho no sistema de tratamento da água bruta, desde que fossem realizadas algumas manobras operacionais. Além disso, verificou-se um ótimo desempenho na desidratação do lodo com a utilização de decanto-centrífugas, implementadas com custo inicial baixo (BARBOSA, 1997).

### 3.3. Recuperação do alumínio

A recuperação do alumínio em escala real foi muito utilizada nas estações de tratamento de grande porte no Japão, um dos países mais industrializados do mundo, com uma população de mais de 120 milhões de pessoas concentradas em grandes áreas urbanas. No entanto, isso não é mais praticado, devido ao comprometimento do alumínio recuperado pelos metais pesados e compostos orgânicos existentes no lodo; em acréscimo, fatores econômicos inviabilizam a recuperação, pois o custo do alumínio recuperado é praticamente o mesmo do produto adquirido no mercado (KAWAMURA & TRUSSELL, 1991).

De acordo com alguns autores (FULTON, 1974; SENGUPTA & BO SHI, 1992; BISHOP *et al.*, 1991) a recuperação do alumínio justifica-se pelos seguintes aspectos:

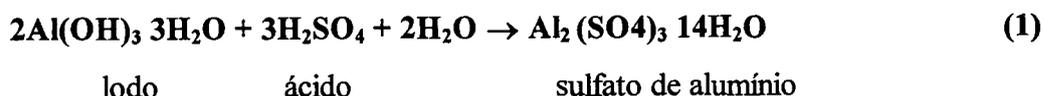
- 1- econômico, pelo uso do alumínio recuperado;
- 2- com a recuperação do alumínio existente na forma de hidróxido no lodo (até 80 %), obtém-se a redução do volume de lodo, diminuindo o custo de transporte e disposição final;
- 3- o custo da desidratação de lodos acidificados para recuperar alumínio, é aproximadamente o mesmo do sistema de desidratação sem acidificação;
- 4- embora o alumínio não esteja incluído na lista dos poluentes prioritários, sua toxicidade tanto nas formas livres como complexas pode causar vários efeitos para a vida aquática, visto que grande parte do lodo produzido em ETAs é descarregado em águas superficiais;
- 5- a elevada porcentagem de alumínio livre que pode ser recuperada;
- 6- é fácil a operação do método de recuperação do alumínio do lodo, podendo ser utilizada tanto em grandes como em pequenas estações de tratamento.

### 3.3.1. Métodos de recuperação ácida e alcalina do alumínio

O alumínio pode ser recuperado tanto por processos alcalinos quanto ácidos; no entanto, a acidificação com ácido sulfúrico é a mais utilizada.

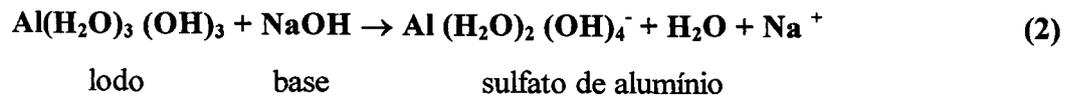
Quando o lodo é suficientemente acidificado com ácido sulfúrico, o alumínio é dissolvido do lodo na forma de sulfato de alumínio, possibilitando sua recuperação (FULTON, 1974).

A estequiometria da recuperação do alumínio via ácida, se dá pela reação:



O lodo remanescente após a recuperação é geralmente menos volumoso e mais concentrado, podendo ser facilmente desidratado. O alumínio recuperado pode ser utilizado como coagulante ou como removedor de fósforo do esgoto sanitários.

Já, se o processo de recuperação utilizado for por via alcalina, tem-se:



### 3.3.2. Etapas do processo de recuperação do alumínio

O processo de recuperação do alumínio é realizado em três etapas distintas:

- 1- o lodo deve ser concentrado em taxas maiores que 2 % de sólidos, para facilitar o manuseio;
- 2- o lodo concentrado é misturado com ácido sulfúrico, produzindo uma solução de sulfato de alumínio;
- 3- a separação do sulfato de alumínio da matéria remanescente do lodo, após a reação com ácido sulfúrico, pode ser feita por sedimentação ou por filtro prensa.

Os sólidos resultantes da separação do sulfato de alumínio do lodo são normalmente misturados com cal para sua neutralização e condicionamento, para facilitar sua desidratação futura, se desejada.

Na cidade de Durham (USA), testou-se, em escala real, a eficiência da recuperação do alumínio do lodo de uma estação de tratamento de água com capacidade de 10m<sup>3</sup>/s, avaliando-se a possibilidade técnica da desidratação mecânica do lodo acidificado resultante do processo de recuperação do alumínio, e também a obtenção de parâmetros de projeto para a construção de sistemas mecânicos de desidratação, específicos para lodos acidificados. Primeiramente, foram testados em escala de bancada três dispositivos de desidratação: filtro prensa de esteira, centrífuga e filtro prensa. No entanto, somente a centrífuga e o filtro prensa foram testados em escala piloto. Os testes demonstraram que ambos os dispositivos podem ser utilizados na desidratação de lodos acidificados, com a obtenção de concentrações de sólidos na torta de lodo seco de 30 % ou mais. Foram observados uma excelente eficiência na desidratação dos lodos acidificados em comparação com o lodo sem acidificação, e uma taxa de alumínio recuperado muito boa, a níveis de 60 a 80 % do alumínio inicial. Para cada tonelada de alumínio recuperado, foi necessária a utilização de 0,68 t de ácido sulfúrico. A recuperação do alumínio do lodo era proposta para uso como coagulante na estação de tratamento de água e como removedor de fósforo na estação de tratamento de esgoto da cidade (BISHOP *et al.*, 1991).

### 3.3.3. Influência das características do lodo no processo de recuperação do alumínio

Substâncias contidas no lodo que podem influenciar no processo de recuperação do alumínio e na operação de desidratação do lodo. A tabela seguinte identifica algumas dessas substâncias.

Tabela 3.5. Substâncias contidas no lodo e sua influência na desidratação, acidificação e na operação de filtração do alumínio

Substância	Desidratação	Acidificação	Filtração do alumínio
Hidróxido de alumínio	Inibe	Reação completa	*
Aditivos orgânicos	Inibe	hidrolisados	*
Aditivos inertes			
Argila	Aumenta	*	Aumenta
Carvão	*	*	*
Matéria mineral reativa	*!	Reação completa	*
Sólidos inertes	Aumenta	*	Aumenta
Sólidos orgânicos	Inibe	hidrolisados	*

Fonte: FULTON (1974)

\* Não influencia significativamente;

! Poderá inibir quando acumulado no alumínio recuperado.

No processo de recuperação do alumínio de lodo de ETA, vários problemas podem ocorrer aparentemente. Destacam-se entre eles ( SENGUPTA & BO SHI, 1992):

- o processo não é seletivo, isto é, não é recuperado somente o alumínio, mas também outras substâncias solúveis em condições ácidas, como colóides (matéria orgânica) e metais;
- o alumínio recuperado, quando utilizado como coagulante, aumenta a concentração de matéria orgânica e o potencial de formação de trihalometanos na água clarificada;
- a concentração de metais pesados (cobre, chumbo, cádmio, e outros) no lodo é normalmente baixa, mas sua concentração pode aumentar com a recirculação do alumínio recuperado.

A fim de solucionar esses problemas, SENGUPTA & BO SHI (1992) estudou um processo simples de remoção de alumínio, com a utilização de uma membrana seletiva

composta, formada por pequenas partículas de polímeros fixados numa fina superfície de polytetrafluoroetileno. Foi observada a alta eficiência na recuperação do alumínio, sem que ocor aparentemente a contaminação com matéria orgânica, metais pesados e manganês. A quantidade desses metais recuperada foi muito baixa, sendo independente da quantidade de metal existente no lodo. A membrana demonstrou ser muito durável; mesmo depois de 30 ciclos de operação, a capacidade de recuperação do alumínio permaneceu a mesma.

A capacidade de regeneração dos coagulantes contidos no lodo está diretamente relacionada com a presença de hidróxidos precipitados; quanto maior o teor de hidróxido de alumínio tri-hidratado (mecanismo de coagulação por varredura) no lodo, maior será o potencial de recuperação do coagulante mediante ataque ácido ou alcalino. As outras espécies de alumínio presentes no lodo sob a forma de hidroxicomplexos adsorvidos em colóides inorgânicos, e o alumínio presente na estrutura de matéria argilosa e silicosa contida na água bruta, dificilmente serão solubilizadas nas condições usualmente utilizadas na recuperação de coagulantes (GONÇALVES *et al.*, 1997).

Em estudo recente, no qual foi avaliada a possibilidade de recuperar o alumínio contido no lodo de uma ETA na região metropolitana de Belo Horizonte, verificou-se, considerando uma recuperação máxima de 75 % de alumínio, que o custo de recuperação do alumínio seria aproximadamente o dobro do custo de aquisição deste produto no mercado (CASTRO *et al.*, 1997).

### **3.4. Disposição final do lodo de ETA**

O lodo desidratado pode ser disposto de diversas maneiras: no curso de água (disposição não adequada), aplicado no solo, em aterros sanitários, ser codisposto com o lodo de estações de tratamento de esgoto, ser utilizado como removedor de fósforo em estações de tratamento de esgotos domésticos, descartado na rede de coleta de esgoto doméstico, ou incinerado. Também pode ser usado na fabricação de blocos de concreto ou tijolos refratário.

#### **3.4.1. Descarte com esgoto doméstico**

O descarte do lodo de ETA com esgoto sanitário, pode ser realizado quando a velocidade do sistema de coleta do esgoto sanitário for conveniente e a estação de tratamento

tiver capacidade de absorver essa carga de lodo. Em sistemas de lodo ativado o lodo de ETA é aceitável, mas o descarte em estações com digestão anaeróbia deverá ser avaliado, a fim de determinar o impacto da deposição de material inerte nos digestores (BISHOP, 1978).

### **3.4.2. Disposição no solo**

Uma análise feita por ELLIOTT & DEMPSEY (1991) no processo de disposição no solo, mostra que esse sistema está se tornando muito popular. O lodo pode favorecer a modificação do pH e a capacidade de retenção de água, mas apresenta baixo poder fertilizante. É necessário um suplemento de fósforo, devido a sua forte capacidade de ligação com o alumínio. As concentrações de metais pesados podem limitar a sua aplicação; no entanto, este aspecto poderá ser resolvido com o controle da pureza dos coagulantes químicos. Esse método de disposição do lodo no solo inclui a aplicação em áreas de cultivo, na recuperação de áreas de minas ou o uso como material de cobertura em aterros sanitários.

Duas técnicas de disposição são muito utilizadas no Japão: a utilização do lodo em fábricas de produtos de concretos ou tijolos e a utilização como condicionante do solo. Em Tóquio, a Estação de Missato, que produz em torno de 23 t/dia, tem seu lodo utilizado em fazendas próximas como acondicionante de solo; e, na cidade de Osaka, a Estação de Toyono, que produz mais de 22 t/dia, tem seu lodo consumido pelas fábricas de cimento (KAWAMURA & TRUSSELL, 1991).

No Colorado (EUA), são realizadas a disposição final do lodo seco e efetuada em aterros sanitários ou na codisposição com lodo de esgoto sanitário, em programas aplicados na área da agricultura. Além disso, devido à grande quantidade de áreas de minas abandonadas, está sendo pesquisada a aplicação desse lodo nessas áreas, que servem como uma interessante alternativa de disposição. Estudos realizados em uma dessas áreas, onde primeiramente foi aplicado o lodo no solo e posteriormente foi realizada a plantação de grama, sendo feitas análises do solo e da grama, não foram observadas alterações nas características dos mesmos. Em estudos complementares, foi desenvolvida uma equação para determinar a quantidade máxima de lodo de hidróxido de alumínio que poderá ser aplicado no solo com lodo de esgoto doméstico, a fim de ser eliminada a necessidade de um suplemento de fósforo ( NICHOLSON & GOLDBACH, 1991).

A equação foi desenvolvida para ser aplicada somente no local específico de disposição, no Colorado, sendo composta pela seguinte estrutura:

$$\text{MIX} = \frac{\text{P(DSS)} - 1,15 \text{ Al (DSS)} - 0,55 \text{ Fe (DSS)}}{1,15 \text{ Al (WTPS)} - 1,15 \text{ Al (DSS)} + 0,55 \text{ Fe (WTPS)} - 0,55 \text{ (DSS)}} \quad (3)$$

MIX= fração de lodo de ETA máxima na mistura com lodo doméstico;

DSS = esgoto doméstico;

WTPS = lodo de ETA;

P = quantidade de fósforo no lodo especificado;

Al = quantidade de alumínio no lodo especificado;

Fe = quantidade de ferro no lodo especificado.

O lodo de ETA, quando utilizado como condicionante de solo, aumenta sua coesão do mesmo, que aumenta a medida que se eleva a umidade do mesmo. Lodos de origem de estações de abrandamento (lodo rico em cal) incrementam a coesão do solo com quantidades menores de umidade. Os hidróxidos de  $\text{Al}^{+3}$  e  $\text{Fe}^{+2}$  tendem a flocular partículas do solo. No momento da desidratação, o hidróxido de alumínio e ferro atuam como agentes cimentantes entre as partículas de solo, com a redução do empolamento e o incremento da estabilidade de agregação. O efeito pode ser observado no gráfico seguinte, no qual foi realizado um teste de coesão em diferentes umidades do solo, quando uma porcentagem de 10 % de dois tipos de lodo (lodo de ETA e de estações de abrandamento) foram misturados (COMMITTEE REPORT - PARTE 2, 1978 e ELLIOT & DEMPSEY, 1991).

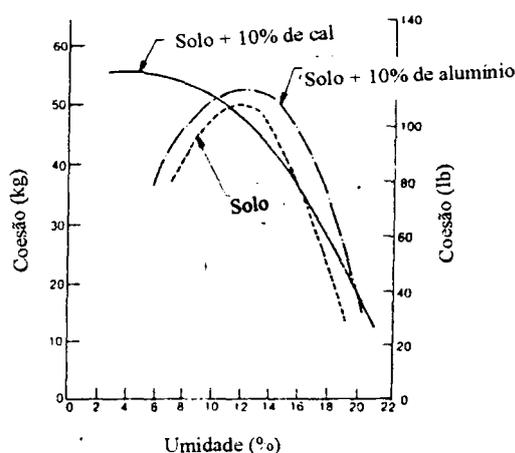


Figura 3.2 – Efeito do lodo de ETA em solos coesivos (Fonte: COMMITTEE REPORT - PARTE 2, 1978)

A aplicação de lodo de ETA no solo em áreas agricultáveis é menor quando comparada a de lodo de ETE, que apresenta uma constituição mais rica em nutrientes (NPK). Além disso, a fácil ligação do alumínio do lodo de ETA com fósforo solúvel no solo, diminui a sua disposição para às plantas, necessitando a aplicação de uma quantidade extra de fósforo. Em solos com pH baixo podem resultar níveis altos de íons  $Al^{+3}$ , que são tóxicos as plantas a partir de determinadas concentrações (ELLIOTT & DEMPSEY, 1991).

As preocupações que decor aparenterem da aplicação do lodo de ETA no solo são:

- o possível desenvolvimento de déficit de fósforo (P);
- toxicidade do alumínio para as plantas, que pode ocorrer a partir de concentrações tão baixas quanto 1ppm;
- absorção pelas plantas de metais pesados de produtos químicos usados tanto na conservação quanto no tratamento da água.

A literatura propõe uma taxa de aplicação do lodo no solo de 0,5 a 2,5 % da massa de solo seco. A toxicidade do lodo às plantas é normalmente observada em valores de pH menores que 5,0, mas pode ocorrer em valores acima de 5,5 em solos Cauliníticos. Esse problema é resolvido elevando-se o valor do pH com o uso de calcário. Para a aplicação do lodo no solo, a concentração máxima de sólidos é de 10 %, para facilitar a difusão do lodo no solo com o uso de equipamentos específicos, injetores. Caso seja necessária a diluição, será preciso utilizar uma área maior de aplicação, inviabilizando essa técnica (LUCAS *et al.*, 1994).

LUCAS *et al.* (1994), conduziram um experimento com a leguminosa “*Dixie Duet frescue*” (Frescue) cultivada em solo com cargas de lodo de ETA de 0, 1, 2 e 4 %, com uma concentração de 15.400 mg Al/L no lodo. Também foram aplicadas duas taxas distintas de cal e duas de fósforo. O experimento foi realizado em vasos com capacidade de 1,9 L, com 2 kg de mistura de solo mais lodo e nutrientes como cal, P, K, Ca, Mg em dosagens recomendadas pelos padrões utilizados na agricultura. Foram analisados o tecido da leguminosa, o solo e o lodo, observando-se que o lodo de ETA reduz o crescimento da leguminosa, quando cultivada em estufa. A aplicação suplementar do P incrementou o rendimento pela reposição do P deficiente causado pelo lodo aplicado. Com uma mistura de 2 % de lodo, duplicando a carga e P recomendados pelos padrões usuais na agricultura (50 mg.P/kg solo) aparentemente resolveu-se o problema do déficit de P pela aplicação de lodo de ETA. A adição de lodo, P e

cal não tiveram efeito significativo na concentração de K, Ca, Mg, Zn, Fe e B e alumínio no tecido da “*frescue*”.

Muitos testes foram realizados avaliando a toxicidade do lodo de ETA às plantas quando disposto como condicionante de solo, verificando-se que uma taxa de 2 a 3 % do peso seco de lodo relativamente ao solo pode ser aplicada sem comprometimento ao meio ambiente. No entanto, essas experiências foram realizadas em estufas ou em laboratório, num período de tempo muito curto. Assim, GEERTSEMA *et al.* (1994), investigaram os efeitos da aplicação do lodo de ETA no solo de uma floresta, durante um período de 30 meses. Nesse estudo, foi observado o efeito da aplicação do lodo de ETA no crescimento dos pinheiros, nas mudanças da qualidade da água subterrânea e na mobilidade do alumínio no ambiente do solo.

O experimento realizado por GEERTSEMA *et al.* (1994), consistiu na aplicação de taxas de lodo de ETA de 0, 1,75 e 2,5 % no solo, fazendo-se combinações com o uso de cal e suplemento de fósforo, em um total de 12 combinações. O lodo era aplicado nos 15 cm de profundidade na camada superficial do solo, que possuía um pH = 4,7, moderadamente ácido. Cal foi aplicada para corrigir a acidez natural do solo e o lodo aplicado apresentava pH = 6,5. Foram obtidas conclusões a curto (9 meses) e a longo prazo (30 meses) dos efeitos do lodo de ETA aplicados no solo.

As seguintes conclusões foram feitas da operação a curto prazo:

- cobre e NPK incrementaram na profundidade de 7 e 15 cm do solo, pois apresentaram-se relativamente abundantes no lodo;
- migrações de metais não foram observadas na coluna de solo, na água do solo e na água subterrânea. Nitrato foi observado, mas foi atribuído ao distúrbio ocasionado no solo no momento da aplicação do lodo;
- o crescimento dos pinheiros não foi afetado, em decorrência da aplicação do lodo;
- estudos paralelos em estufas demonstraram deficiência de fósforo e correspondente decréscimo no rendimento de leguminosas.

Como conclusão final, a curto prazo a aplicação de lodo de ETA não causou efeitos negativos significativos no local estudado.

A longo prazo, foram observados os seguintes aspectos:

- as características do solo, da água subterrânea e a análise de crescimento do pinheiro não demonstraram diferenças significativas estatisticamente quando comparados locais com ou sem aplicação do lodo;
- não houve migração significativa de metais através do solo ou da água subterrânea. Somente metais como zinco e cobre (contaminantes do lodo aplicado) foram encontrados na camada de aplicação do lodo de 7 a 15 cm de profundidade do solo;
- não foi observado efeito da disponibilidade de fósforo para as plantas ou para o crescimento do pinheiro depois da aplicação do lodo, um fenômeno que é observado a curto-prazo;
- não resultou contaminação por nitratos da água subterrânea ou do solo com a aplicação do lodo.

Depois de 30 meses de monitoramento da área de aplicação do lodo, concluiu-se que o mesmo pode ser aplicado em áreas de floresta sem efeitos negativos ao meio ambiente, quando utilizadas taxas de lodo variando entre 1,5 a 2,5 % do peso seco do solo.

### **3.4.3. Uso do lodo no processo de floculação**

CORDEIRO (1981) estudou o reúso dos subprodutos gerados no tratamento de água, com ênfase para lodos sedimentados nos decantadores como auxiliares no processo de floculação. As principais conclusões obtidas foram:

- não há interferência na qualidade da água decantada. De preferência, o lodo deve ser usado em águas com baixa turbidez;
- o tempo de floculação poderá ser diminuído, pois os flocos são formados em pouco tempo; também o tempo de sedimentação poderá ser diminuído, uma vez que as condições de sedimentação dos flocos são melhores;
- redução no consumo de coagulantes;
- poderá haver redução na quantidade global de lodo formado, devido a redução das dosagens de coagulantes.

#### **3.4.4. Disposição do filtrado do lodo**

Os trabalhos realizados relativamente ao tratamento de lodo de ETA, têm como objetivo principal a otimização dos processos de desidratação e disposição final da torta de lodo seca, seja a disposição em aterros sanitários ou aplicação no solo. O efluente líquido resultante da desidratação do lodo tem normalmente sua disposição feita diretamente no curso de água, ou retorna ao sistema de tratamento de água.

O artigo que sintetiza as técnicas de tratamento de lodo desenvolvido pelo COMMITTEE REPORT - PARTE 2 (1978) salienta o cuidado que se deve ter com os efluentes produzidos durante a desidratação do lodo de ETA. Esse efluente poderá ser uma fonte de poluição devido as suas características químicas, adquiridas pela adição de produtos químicos para otimizar a desidratação do lodo. Os lodos que são condicionados a pH acima de 11,5 (utilização da cal, por exemplo), podem converter uma grande fração de hidróxido de alumínio insolúvel para alumínio solúvel. Além disso, os produtos químicos condicionantes de lodo podem contribuir para o aumento da concentração de metais traços no filtrado do lodo.

Os métodos recomendados para a disposição final dos efluentes inclui o descarte direto nos cursos de água ou o descarte no sistema de tratamento de esgoto doméstico. O filtrado deve sofrer um pré-tratamento, respeitando-se os padrões de emissão estabelecidos nas leis de proteção ao meio ambiente. O pré-tratamento é composto pelas técnicas de neutralização e sedimentação, antes da disposição final.

No caso do Japão, quando o lodo de ETA é condicionado com polímeros, o filtrado resultante da operação de desidratação não pode retornar ao sistema de tratamento da água. A utilização de polímeros no processo de tratamento de água é proibido, naquele país, pois existem indícios dos males que este tipo de produto pode causar à saúde da população consumidora desta água (KAWAMURA, 1991).

#### **3.4.5. Disposição em aterros sanitários**

Estudos realizados pelo COMMITTEE - PARTE 2 (1978), salientam uma preocupação com a disposição desse lodo em aterro sanitário, mesmo com o controle adequado do lixiviado evitando a poluição das águas superficiais e subterrâneas. A disposição do lodo de ETA em

aterro sanitário tem sido uma preocupação, porque o processo de degradação biológica em aterro sanitário é o anaeróbio e na fase ácida de fermentação, é produzido lixiviado em níveis de pH entre 5,5 e 7,0; esse lixiviado, com uma pequena capacidade tampão, pode dissolver algum metal pesado contido no lodo.

Em 1975, um estudo em lisímetro feito pela Monroe County Water Authority, em Nova Iorque, avaliou as características do lixiviado resultante da disposição da torta de lodo de ETA seco. No estudo, foi utilizado o lodo acondicionado com cal até a obtenção de uma concentração de sólidos de 4 %, com posterior desidratação mecânica, até uma concentração de 40 %. O experimento era composto por uma camada de 21 cm de espessura de lodo seco compactado, sobre a qual foi posta uma camada de 42 cm de espessura de areia. Água destilada era distribuída sobre a camada de areia, permitindo a percolação através da areia simulando a chuva em um aterro sanitário. Amostras do lixiviado eram coletadas e analisadas para verificar a mudança da qualidade da água recirculada no experimento (o lixiviado). O lisímetro foi operado por um período de 74 dias; durante esse tempo um total de 12 m<sup>3</sup> de água deionizada foi aplicado sobre a camada de lodo. A taxa de aplicação da água deionizada foi baseada na média de chuva do local do experimento, de maneira que o volume total de água deionizada aplicada equivalia ao volume de água precipitada durante um período de 70 anos (COMMITTEE REPORT - PARTE 2, 1978).

As principais observações realizadas durante o experimento foram:

- o pH do lixiviado do lodo de ETA foi sempre alcalino, com valores iguais a 10 para taxas de escoamento de água elevadas e valores de pH iguais a 9 para taxas de fluxos menores;
- a concentração de alumínio no lixiviados aumentou para mais de 11 mg/L durante os sete primeiros dias de operação do lisímetro. Do oitavo dia em diante, até o vigésimo dia, as concentrações diminuíram e permaneceram relativamente constantes em 3 mg/L, tendo sido obtidos também valores menores durante o período de teste;
- a concentração de alumínio no lixiviado foi um pouco menor que a concentração molar teórica de alumínio para os níveis de pH encontrados durante o teste. A concentração do alumínio depende do pH: entre pH 5 e 8,5, o hidróxido de alumínio é relativamente estável, com pH acima ou abaixo desse valor o alumínio é solúvel em várias formas complexas;
- a concentração de cloretos no lixiviado incrementou durante o período de análise. No final do período de ensaio, a concentração de cloretos no lixiviado era de 16,1 mg/L;
- o pH do lixiviado dependia da taxa de escoamento da água através do aterro sanitário, com o

pH variando no intervalo de 8 a 9.

Concluiu-se deste experimento, que o lodo de ETA acondicionado com cal pode ser disposto em aterros sanitários. Duas vantagens foram citadas complementarmente: a combinação do lixo com o elevado pH do lodo ajuda na neutralização das característica de pH baixo no aterro e a redução da solubilidade de alumínio e outros metais.

### 3.4.6. Estudo da viabilidade técnico-econômica de tratamento e disposição final do lodo de ETA

Na região Metropolitana de São Paulo, que é atendida por sete estações de tratamento de água, foi realizado um estudo para implementação de sistema de recuperação das águas de lavagem de filtros, tratamento e disposição dos resíduos sólidos das ETAs, com o objetivo de minimizar o impacto ambiental ocasionado pela disposição inadequada desses resíduos nos cursos de água receptores. Estes encontravam-se em um estado avançado de degradação, principalmente devido ao material originado pela lavagem dos filtros, que corresponde em média a 1,5 m<sup>3</sup> de água tratada, suficiente para abastecer uma população na ordem de 430 mil habitantes. Após a análise técnico-econômica, foi montado o seguinte cenário:

Tabela 3. 6 - Alternativas de tratamento do lodo para as ETAs da região metropolitana de São Paulo

Características	ETA Guarau		ETA ABV	
	Alt.1	Alt.2	Alt.1	Alt.2
Capacidade (t/dia)	66	66	72	72
Teor de sólidos no lodo seco(%)	20	15	20	15
Características das unidades	1 tanque regularizador de fluxo com V=1600 m <sup>3</sup> e 2 adensadores $\phi = 26,5$ m		1 tanque regularizador de fluxo com V= 8000 m <sup>3</sup> e 2 adensadores $\phi = 27,0$ m	
Volume médio anual de lodo a ser disposto (m <sup>3</sup> /dia)	(a) 135 (b) 160 (*) (c) 200	(a) 180 (b) 213 (*) (c) 267	220	393
Disposição final	Aterro Sanitário Bandeirantes (14 km)		Aterro Santo Amaro (4 km)	

Fonte: SEREC (1987)

(\*) As letras indicam à capacidade nominal da ETAs: a = 22 m<sup>3</sup>/s; b = 26 m<sup>3</sup>/s; c = 33 m<sup>3</sup>/s.

Alt.1: desidratação por centrifuga;

Alt.2: desidratação por filtros prensa de correia;

ABV = ETA Alto da Boa Vista;

Tabela 3.7 - Alternativas de tratamento do lodo para as ETAs da região metropolitana de São Paulo

Características	ETA Rio Claro	ETA Rio Grande	ETA Alto Cotia
Número de lagoas	4	4	4
Volume de cada lagoa (m <sup>3</sup> )	9.000	6.300	5.400
Teor de sólidos do lodo desidratado (%)	10	10	10
Volume de lodo a ser disposto a cada quatro meses (m <sup>3</sup> )	3.600	2.520	2.160
Disposição final	Área da SABESP em Morro Grande (15 km)	Aterro Sanitário Santo Amaro (35 km)	Lixão Municipal (8 km)

Fonte: SEREC (1987)

Observou-se nesse estudo, que o custo marginal para cada 1.000 m<sup>3</sup> de água recuperada variou de 7,5 % a 16,96 % da tarifa média praticada. O custo marginal de implantação dos sistemas de tratamento e disposição final de lodos das ETAs representou, para cada 1.000 m<sup>3</sup> de água tratada, 0,69 % a 1,86 % da tarifa, percentuais considerados absolutamente insignificantes. O estudo concluiu que as hipóteses formuladas foram viáveis e recomendáveis sob qualquer ponto de vista.

Em outro estudo realizado, a fim de obter uma solução para o tratamento dos resíduos da ETA do Sistema de Abastecimento de Água do Rio das Velhas (MG), com capacidade para tratar 6m<sup>3</sup>/s, foram escolhidas as seguintes unidades de tratamento (CASTRO et al, 1997):

- três adensadores com diâmetro de 24 m, 3 m de profundidade e taxa de aplicação de sólidos de 25 kg.SST/m<sup>2</sup>.dia
- dois acumuladores de lodo com altura de 6 m, e diâmetro de 21 m;
- unidades de desidratação com 5 centrífugas, capacidade de 37 t/dia e teor de sólidos no lodo seco entre 35 a 45 %;
- cinco lagoas de lodo com volume de 69.000 m<sup>3</sup>.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Aspectos gerais

A desidratação natural de lodos de ETAs em leitos de secagem com diferentes meios drenantes/filtrantes, e o polimento final do líquido filtrado/drenado para posterior disposição final, foram avaliados pela condução de quatro experimentos. Em todos os experimentos estudados, foram observadas diferentes características físico/químicas dos efluentes em análise, com ênfase para o elemento alumínio, visando acompanhar o desempenho e eficiência da operações e do processos utilizados na pesquisa, na atenuação do metal referido.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Técnicas Ambientais do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, no Campus da UFRGS, em Porto Alegre, RS.

O **Experimento 1** foi dividido em duas etapas distintas: na primeira, simulou-se (em nível de bancada) um conjunto de leitos de secagem com diferentes espessuras da camada drenante de areia, a fim de avaliar a desidratação natural do lodo de ETA, sem a utilização de condicionantes químicos; na segunda, observou-se a solubilização do alumínio do lodo desidratado quando submetido à sistemática de rega por solução ácida.

No **Experimento 2**, foi realizada a simulação (em nível de bancada) de um conjunto de leitos de secagem com a utilização de diferentes tipos de mantas filtrantes como camada drenante/filtrante.

No **Experimento 3**, foi observada a desidratação natural do lodo de ETA em um conjunto de leitos de secagem (em nível de bancada), onde se fez o uso conjunto de mantas filtrantes dispostos sobre camadas drenantes de areia.

No **Experimento 4**, avaliou-se a influência de composto orgânico produzido a partir da compostagem de resíduos sólidos orgânicos urbanos, na atenuação do alumínio existente no filtrado/percolado resultante da desidratação natural do lodo de ETA, em leitos de secagem.

No diagrama da figura 4.1, são apresentadas as etapas e as fases da pesquisa

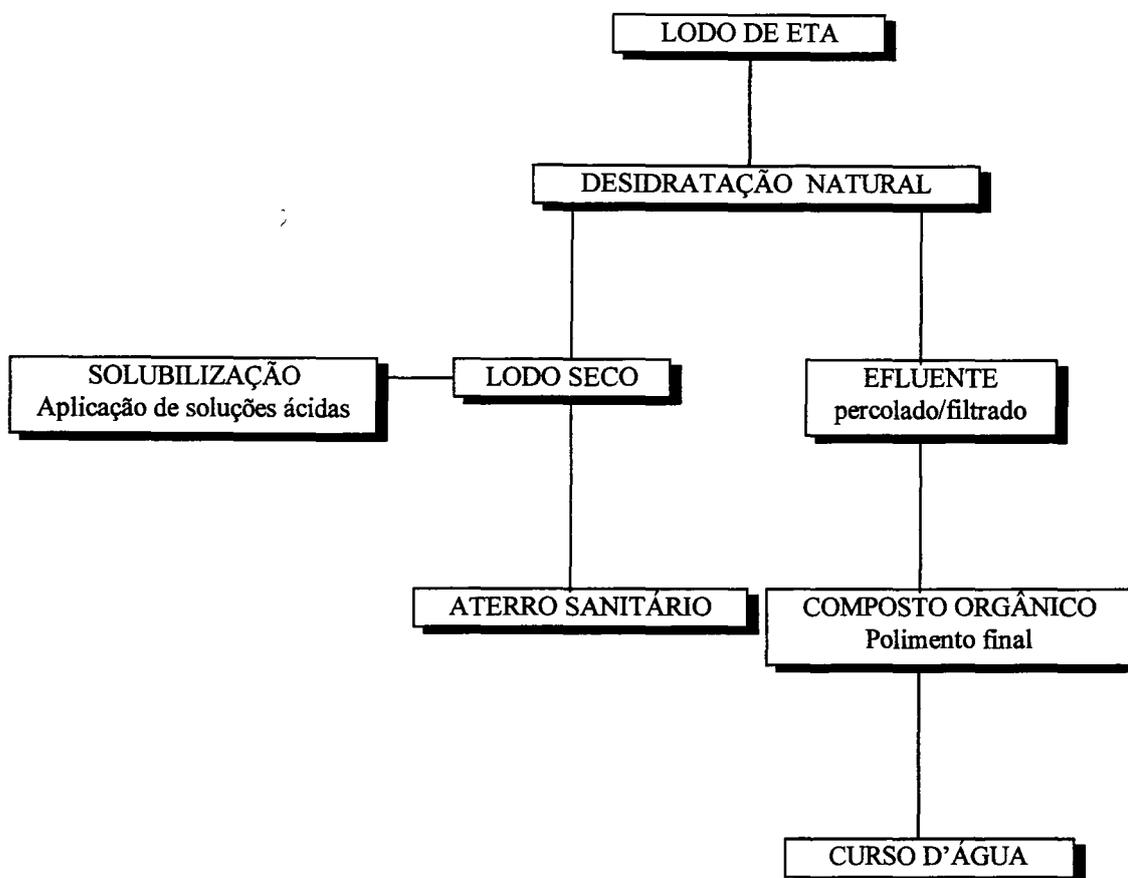


Figura 4.1 - Fluxograma das distintas etapas da pesquisa

## 4.2. Lodo de ETA e composto orgânico utilizados na pesquisa

### 4.2.1. Lodo de ETA

O lodo utilizado na pesquisa foi obtido na Estação de Tratamento de Água São João/Navegantes, operada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), em Porto Alegre/RS. Essa estação com capacidade de tratar uma vazão máxima de 2146 L/s e uma mínima de 1043 L/s, possui o processo de clarificação não convencional, tipo “super pulsator”, com a utilização de sulfato de alumínio como coagulante químico. Todo o lodo produzido no processo de clarificação da água é descartado continuamente na rede de esgoto pluvial, sem qualquer tipo de tratamento.

O lodo utilizado nos experimentos foi retirado da unidade de floculação/decantação, da qual a remoção de lodo é contínua, através do sistema mecanizado utilizado pelo “super pulsator”. A quantidade de sólidos totais contida no lodo no momento do descarte era extremamente baixa, de modo que foi necessário o espessamento do lodo por um período de três dias. O espessamento foi realizado da seguinte maneira: o operador da estação alterou o funcionamento normal do dispositivo mecânico da unidade, que possui a função de realizar o chamado pulso, descartando um volume determinado de lodo sedimentado nesta. Assim, o lodo ficou retido por um período de três dias, antes de sua coleta na tubulação de descarte.

Logo após a retirada do lodo, o mesmo foi armazenado em galões de 20 L e acondicionado em refrigeração no laboratório, até o momento de sua utilização nos experimentos.

A tabela 4.1 apresenta os resultados, em valores médios, obtidos nas análises das características físico/químicas no lodo de ETA São João/Navegantes.

Tabela 4.1 - Características físico/químicas do lodo bruto da ETA São João/Navegantes

Parâmetros	Intervalo dos valores observados
Umidade (%)	96,50 – 97,90
Sólidos totais (mg/L)	23,60 – 23,96
Sólidos totais (%)	2,10 - 3,50
Sólidos fixos (%)	64,41 – 76,04
Sólidos voláteis (%)	23,96 – 35,59
Al <sup>+3</sup> (%)	5,9 – 6,81
Al <sup>+3</sup> (mg/L)	1.676 – 1.890
pH	5,45 – 6,31
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	4.665 – 10.240

Al<sup>+3</sup> (%) expresso em base seca 105 - 110 °C.

#### 4.2.2. Composto orgânico

O composto orgânico utilizado na pesquisa foi obtido junto à usina de compostagem da cidade de Ivoti/RS.

A tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos nas análises de macro e micronutrientes, em sete amostras do composto orgânico referido.

Tabela 4.2 - Macro e micronutrientes do composto orgânico

Parâmetros	Intervalos dos valores observados
Nitrogênio ( % )	0,17 - 0,85
Fósforo ( % )	0,16 - 0,18
Potássio ( % )	0,36 - 0,46
Cálcio ( % )	0,50 - 0,81
Magnésio ( % )	0,18 - 0,26
Carbono orgânico ( % )	5,5 - 6,1
Cobre ( mg/kg )	82 - 96
Zinco ( mg/kg )	310 - 348
Manganês ( mg/kg )	641 - 710
Sódio ( mg/kg )	327 - 377
Ferro ( % )	5,7 - 7,3
Enxofre ( % )	0,12 - 0,14
Amônia ( mg/kg )	10 - 20
Nitrato ( mg/kg )	16 - 220
Cádmio ( mg/kg )	0,57 - 1,40
Cromo ( mg/kg )	82 - 96
Níquel ( mg/kg )	35 - 39
Chumbo ( mg/kg )	77 - 88
Boro ( mg/kg )	29 - 39
Alumínio ( % )	1,67 - 2,55

(%) expressa em base seca 105 - 110 °C

Inicialmente, o composto orgânico foi peneirado, utilizando-se para tanto uma peneira com malha de 0,5 cm de diâmetro; após esta fase, o composto orgânico foi dividido em cinco porções, com 5 kg de composto orgânico cada uma, que foram utilizadas no **Experimento 4**.

### 4.3. Análises físico/químicas

O lodo de ETA (bruto e desidratado), o filtrado/percolado originado da desidratação nos leitos de secagem, o líquido proveniente do ataque do lodo desidratado por solução ácida e drenado dos leitos, o líquido resultante da aplicação do filtrado/percolado dos leitos de secagem sobre composto orgânico e o composto orgânico, foram caracterizados em suas componentes físico/químicas, mediante a realização das seguintes análises:

a) no lodo bruto e no lodo desidratado:

- sólidos totais;
- sólidos fixos;
- sólidos voláteis;
- DQO;
- alumínio total;
- pH;
- macronutrientes (potássio, cálcio, nitrogênio);
- micronutrientes (alumínio, ferro, sódio, cobre e manganês).

b) nos líquidos filtrados/percolados nas operações/processos utilizados nos experimentos:

- DQO;
- cor aparente;
- turbidez;
- pH;
- alumínio total.

c) composto orgânico:

- alumínio total;
- macronutrientes (potássio, cálcio, nitrogênio);
- micronutrientes (alumínio, ferro, sódio, cobre e manganês).

Além das análises acima relacionadas, foram realizados ensaios de solubilização e lixiviação, a fim de classificar o lodo de ETA, conforme ABNT (1987a, 1987b e 1987c).

Para a realização das análises dos efluentes líquidos, foram seguidas as recomendações da STANDARD METHODS FOR EXAMINATION WATER WASTEWATER - APHA, AWWA, WPCF (1992). Para a realização das análises dos substratos sólidos, utilizaram-se as recomendações de TEDESCO *et al.* (1985).

#### **4.4. Construção dos quatro experimentos e sua finalidade**

Em área disponível no laboratório de Engenharia de Água e Solo do IPH, foram montados os quatro experimentos, ou os três sistemas de desidratação natural de lodos de ETA com diferentes meios drenantes/filtrantes, os quais foram denominados **Experimento 1**, **Experimento 2** e **Experimento 3**; em seqüência, montou-se o conjunto de vasos com composto orgânico urbano, onde foi aplicado o filtrado/percolado dos leitos de secagem, o qual foi denominado de **Experimento 4**.

##### **4.4.1. Experimento 1**

Este experimento foi dividido em duas etapas distintas: na primeira, observou-se a desidratação do lodo de ETA apostado sobre um leito de secagem com diferentes espessuras da camada drenante; na segunda, foi avaliada a solubilização do alumínio retido no lodo, quando este foi submetido a uma sistemática de rega por solução ácida.

###### **4.4.1.1. Primeira etapa**

Na primeira etapa, monitorizou-se a variação de vários parâmetros físico/químicos do lodo de ETA, durante a sua desidratação em leitos de secagem com diferentes espessuras da camada drenante/filtrante de areia. Os parâmetros analisados encontram-se listados no item 4.3.

O leito de secagem foi composto por duas partes fundamentais, semelhantes aos leitos de secagem em estações de tratamento de águas residuárias, ou seja, uma camada drenante/filtrante, e um sistema de drenagem, constituído por tubulações que serviram para a

retirada do líquido percolado da instância dos leitos. O lodo foi disposto diretamente sobre a camada superior do meio filtrante (areia fina com diâmetro 0,5 mm)( figura 4.5).

As partes constituintes dos leitos de secagem ficaram assim constituídas:

a) O sistema de leito de secagem em escala piloto:

O sistema de leito de secagem em escala piloto, foi composto por três colunas transparentes de 10 cm de diâmetro e 80 cm de altura, e um meio filtrante de areia, de granulometria e espessuras variáveis. Para a montagem de cada coluna, utilizou-se três garrafas plásticas (embalagens de refrigerantes), cujas extremidades foram retiradas; os cilindros resultantes foram adequadamente colados entre si (cola Poxipol 10 min), para evitar vazamentos durante a experimentação. Resultou um cilindro de 80 cm, em cuja extremidade inferior foi colada um bocal de uma das garrafas, objetivando-se possibilitar o acoplamento do sistema de retirada do líquido, ou de drenagem.

A construção do sistema de leitos de secagem pode ser visualizada em seqüência:

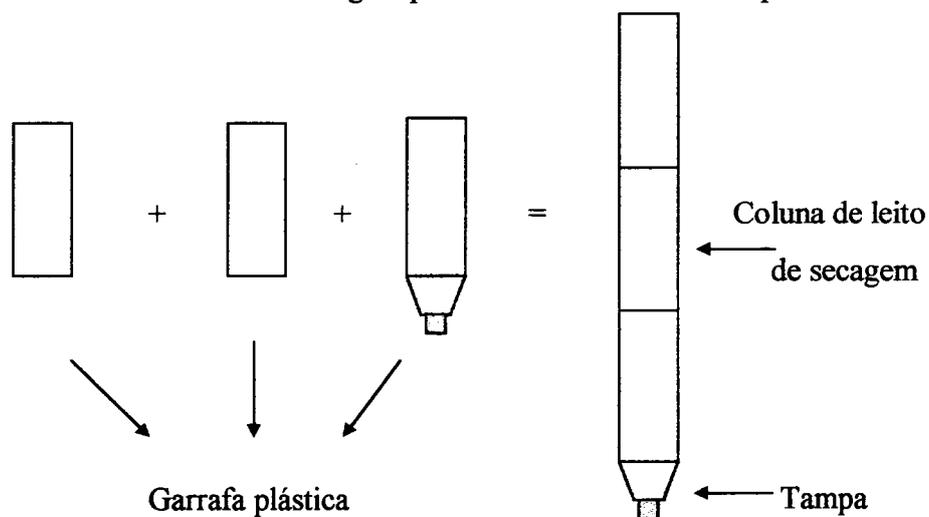
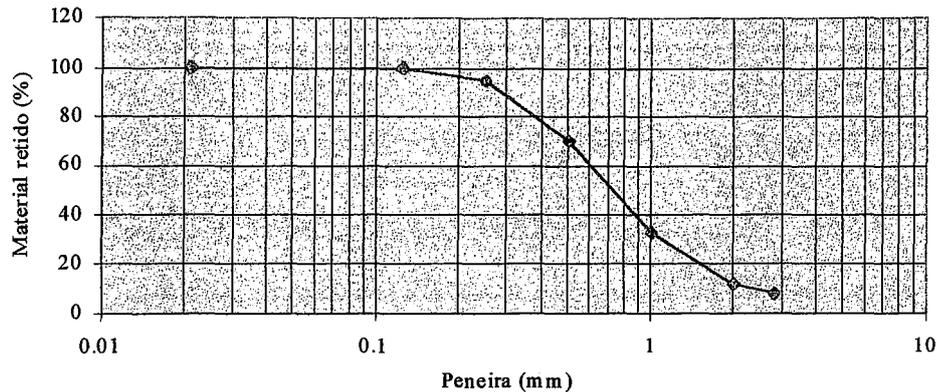


Figura 4.2 - Desenho esquemático da construção do leito de secagem

b) Camada drenante/filtrante:

As camadas drenante/filtrante do leito de secagem foram constituídas somente por areia, de granulometria e em espessuras das subcamadas variáveis. Optou-se pela não utilização de mantas filtrantes no leito de secagem, de maneira a avaliar exclusivamente a eficiência da areia na atenuação do metal alumínio durante a operação de desidratação do lodo de ETA.

O meio drenante/filtrante foi construído com areia comum de construção. Inicialmente, a areia foi cuidadosamente lavada e seca em estufa a 65 °C durante 24 h. Após a secagem, a areia foi peneirada com o auxílio de um peneirador mecânico (model CL-305-A-Soiltest-Engineering Test Equipment), separando-se a mesma em porções de diferentes tamanhos de grão, e se construiu a curva de distribuição granulométrica, conforme é mostrado na figura 4.3.



$$D_{10} = 2\text{mm}$$

$$D_{60} = 0,6\text{mm}$$

$$C_u = 0,3 \text{ (coeficiente de uniformidade)}$$

Figura 4.3 – Curva granulométrica da areia

A montagem do meio drenante/filtrante teve um total de quatro camadas, assim distribuídas: uma camada inferior de areia com granulometria de 2,8 mm, utilizada como suporte para as camadas mais finas. Sobre esta camada, foram colocadas mais três camadas de areia, com granulometrias de 2,0, 1,0, 0,5 mm, respectivamente. As três camadas inferiores tiveram espessuras de de 3,0 cm, perfazendo um total de 9,0 cm; a camada superior de areia de granulometria de 0,5 mm, teve espessuras de 7,0, 14,0 e 21,0 cm em cada coluna simulando leito de secagem, respectivamente.

Estabeleceu-se esta configuração para o meio drenante/filtrante dos leitos de secagem, com a utilização de três camadas de areia de granulometria e espessuras diferentes, a partir das sugestões de METCALF E EDDY (1991) constantes em seqüência:

- 0,15m de areia fina (com coeficiente de uniformidade menor que 40 e tamanho efetivo entre 0,30 a 0,75 mm);
- 0,075 m de areia grossa;
- 0,075 m de brita fina;
- 0,075 m de brita média;
- 0,075 m de brita grossa.

Assim, resultou para os leitos de secagem a seguinte configuração:

Tabela 4.3 - Características das camadas drenantes dos leitos de secagem

Granulometria da areia da camada drenante (mm)	Espessura da camada drenante de areia (cm)		
	Leito 1	Leito 2	Leito 3
	0,5	7	14
1,0	3	3	3
2,0	3	3	3
2,8	3	3	3
Espeçura total	16	23	30

Obs.: As camadas estão orientadas da camada superior para a inferior.

As espessuras das camadas do meio drenante/filtrante do leito de secagem foram, assim, adotadas em torno dos valores médios dos recomendados para leitos convencionais, em função da inexistência de recomendações específicas para secagem de lodos de ETAs.

Após a montagem da camada drenante/filtrante, resultou um sistema de filtração/drenagem de espessuras de 16, 23, e 30 cm. As diferentes espessuras do meio drenante/filtrante tinham como objetivo possibilitar a avaliação da influência destas no que se refere à desidratação e à atenuação máxima de alumínio durante a operação.

#### c) Sistema de drenagem:

O sistema de drenagem é de extrema importância em um leito de secagem, visto que grande parte da água contida na massa de lodo é eliminada por drenagem pela ação da força de gravidade.

O sistema de drenagem foi executado com a perfuração da tampa do bocal da garrafa plástica, na qual foi fixada uma mangueira plástica flexível de 1,0 cm de diâmetro, com o comprimento suficiente para a sua ligação com o reservatório de acumulação do líquido drenado/percolado, que era um copo becker com capacidade de 1.000 ml. Após o acoplamento das mangueiras no bocal das colunas plásticas, realizou-se o preenchimento da parte inferior das colunas, com areia de granulometria 2,8 mm, em uma espessura de 3,0 cm, completando-se assim o sistema de drenagem.

d) Disposição do lodo no leito de secagem:

Tradicionalmente, sobre os leitos de secagem de lodos de ETEs é aplicada uma camada de lodo fluído de 25 a 30 cm de espessura. Optou-se, nesta pesquisa, pela aplicação de uma lâmina de 30 cm de lodo sobre o meio drenante/filtrante do leitos de secagem, cor aparenterrespondente à aplicação de um volume de 2.400 ml de lodo em cada coluna, em função das características dimensionais destas.

e) Coleta das amostras:

Após a aplicação do lodo sobre os leitos, foi monitorizado o volume percolado dos leitos de secagem, durante a desidratação/perda de umidade do lodo. A medida que o volume drenado era suficiente para a realização das análises dos parâmetros físico/químicos (item 4.3), as amostras eram separadas e conservadas, de acor aparentedo com as análises a serem realizadas. Além das análises do líquido percolado durante a desidratação, foram também realizadas análises de diferente parâmetros do lodo bruto (aplicado sobre os leitos) e do lodo desidratado.

Nos líquidos percolados, a cor aparente foi determinada por método colorimétrico (colorímetro de Hellige); a turbidez por método turbidimétrico (turbidímetro Micronal); o pH por método eletrométrico; a DQO por método titulométrico, em refluxo fechado; o alumínio, por espectrofotometria de absorção atômica com chama de acetileno das amostra resfriadas, após o ataque por ácido nítrico e digestão a 190 °C.

No lodo, a umidade percentual resultou da divisão da diferença de peso da amostra na condição natural e seca a 105 - 110 °C (sólidos totais), pelo peso da amostra na condição

natural (KIEHL, 1985); o teor de matéria orgânica total (sólidos totais voláteis) foi determinado pelo método de perda por ignição ou combustão, multiplicando-se por 100 a diferença entre o peso da amostra seca 105 - 110 °C (sólidos totais) e o peso calcinado a 550 °C em mufla (sólidos fixos), e se dividindo este resultado pelo peso seco 105 - 110 °C (KIEHL, 1985). O alumínio total foi determinado no extrato líquido após a digestão da amostra sólida com ácido nítrico e o aquecimento das amostras a 190 °C por duas horas, através da espectrofotometria de absorção atômica com chama de acetileno, de acor aparentado com TEDESCO *et al.*(1985).

A figura 4.4 representa esquematicamente os leitos de secagem

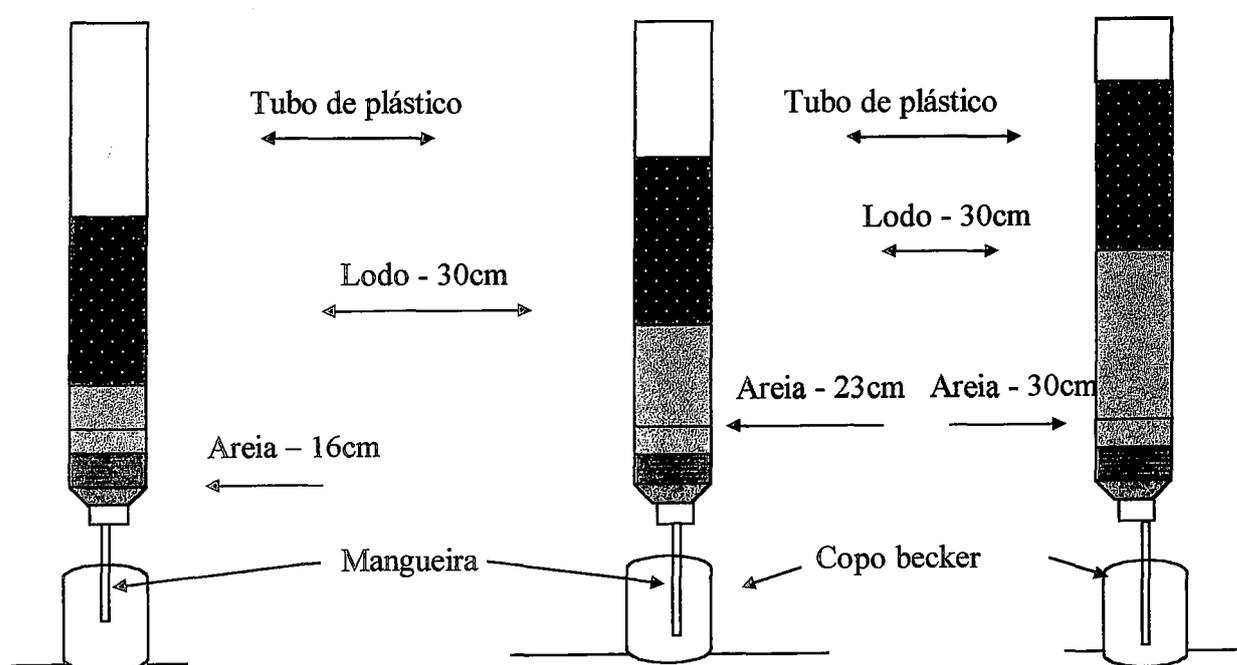


Figura 4. 4 - Esquema dos leitos de secagem

#### 4.4.1.2. Segunda etapa

Esta etapa teve como objetivo avaliar a solubilização do alumínio de lodos desidratados, pelo ataque sistemático por soluções ácidas. Após a desidratação do lodo, iniciou-se o processo de lixiviação, com a aplicação sobre o mesmo de soluções ácidas, cujo valor de pH foi, respectivamente, 6,5 (água potável), 5,0 e 2,5 (água deionizada com ácido sulfúrico concentrado), durante um período de 15 dias de aplicação de cada solução, sobre o mesmo lodo.

A escolha de três valores de pH, teve como objetivo a avaliação da solubilização do alumínio do lodo desidratado frente a meios ácidos, uma vez que eventos de chuvas ácidas (pH inclusive menor que 5,6) já têm ocorrido na Região Metropolitana de Porto Alegre. Evidentemente, a existência de leitos de secagem solidários aos filtros e decantadores, pelo menos durante a ocorrência desses eventos, poderia determinar a solubilização de cargas impactantes ambientalmente, e em níveis desconhecidos. Ao mesmo tempo, o ataque do lodo desidratado por solução em pH 5,0 simulou o ambiente de um aterro sanitário, onde durante a acidogênese ocorrem faixas baixas de pH, com grande geração de ácidos voláteis, e portanto, possível solubilização do metal em estudo, quando o lodo for disposto em caráter final em aterros sanitários. Finalmente, a aplicação da solução com pH 2,5, deveu-se ao fato de que este nível de pH é o utilizado no processo de recuperação de alumínio presente nos lodos de ETAs. É importante salientar que é possível recuperar 80% do alumínio contido na massa do lodo. Deve-se referir, no entanto, que muitos outros tipo de metais também acabam por solubilizar-se durante o processo, acarretando com o passar do tempo o acúmulo de metais pesados no lodo do decantador e na água tratada, restringindo a utilização deste último procedimento referido.

A solução com pH 6,5, em faixa levemente ácida, foi a própria água potável, distribuída à população de Porto Alegre sem cor aparente de pH para faixa neutra ou levemente alcalina. Para a solução ácida com pH 5,0, utilizou-se água deionizada titulada com ácido sulfúrico concentrado. Na preparação da solução ácida com pH 2,5, também utilizou-se ácido sulfúrico concentrado, mas em quantidade necessária para conferir o caráter ácido no patamar desejado.

Após a preparação das soluções, em dois conjuntos com três leitos de secagem cada um, foram realizadas regas com água potável, levemente ácida, durante 15 dias. Decorrido este período, aplicou-se sobre o mesmo lodo, água deionizada acidificada com pH 5,0, por um período idêntico de 15 dias; finalmente, realizou-se a aplicação de água deionizada acidificada para pH 2,5. Com isto, foi possível obter resultados da lixiviação do alumínio do lodo desidratado dos distintos leitos de secagem, para as distintas faixas de pH.

O volume da solução aplicada sobre o lodo foi equivalente a lâmina pluviométrica média diária da cidade de Porto Alegre. A lâmina anual média é de 1.200 mm/ano. Assim, a taxa a ser aplicada diariamente nos leitos, foi proporcional à área superficial dos mesmos,

0,007854 m<sup>2</sup>, o que correspondeu a um volume diário em torno de 26 ml/dia para cada leito. Nesta fase foram utilizados dois conjuntos de leitos de secagem, como descritos no item 4.4.1.1.

O conjunto de leitos foi identificado da forma mostrada na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Esquema da distribuição dos leitos de secagem

Leito de secagem	Espessura da camada drenante (cm)
<b>Leito 1</b>	16
<b>Leito 2</b>	23
<b>Leito 3</b>	30
<b>Leito 4</b>	16
<b>Leito 5</b>	23
<b>Leito 6</b>	30

A fase de desidratação do lodo prolongou-se até a obtenção de uma concentração de sólidos no lodo desidratado, da ordem de 20 %. Esta concentração é considerada adequada para o manuseio com facilidade da massa de lodo. O momento final da desidratação foi identificado pela quantidade mínima de volume de líquido drenado dos leitos de secagem. As amostras compostas do líquido filtrado/drenado foram coletadas e separadas, à medida que o volume drenado acumulado era suficiente para as análises de todos os parâmetros físico/químicos estabelecidos.

Na fase de aplicação das soluções ácidas, as amostras de lixiviado/percolado dos leitos de secagem foram coletadas e separadas, à medida que se obtinha um volume suficiente para a realização das seguintes análises:

- alumínio total;
- pH;
- cor aparente;
- turbidez;
- DQO.

Após a aplicação das soluções, foram realizadas análises no lodo que sofreu as regas, de forma a se determinar a carga de alumínio resultante da aplicação das diferentes soluções.

Com os resultados obtidos, foi possível avaliar o comportamento do lodo, frente à situações que conferiram agressividade ao líquido de rega, pelo abaixamento do pH. Essa hipótese tentou reproduzir o efeito que pode causar sobre o lodo desidratado nos leitos de secagem, um evento de chuva ácida; ao mesmo tempo, permite a avaliação da possível solubilização/lixiviação do alumínio, quando o lodo desidratado for disposto em aterros sanitários.

#### 4.4.2. Experimento 2

Neste experimento, avaliou-se a eficiência na desidratação do lodo em leitos de secagem com meio drenante/filtrante constituído por cinco tipos diferentes de mantas filtrante não tecidas, fabricadas pela Rhodia, conhecida comercialmente por “Bidim.” Este tipo de material possui diversas aplicações; nesta pesquisa, deu-se ênfase às propriedades que o mesmo apresenta em termos de retenção de sólidos e de maior facilidade para o escoamento da água da massa do lodo.

A tabela 4.5 apresenta sucintamente as principais características das cinco diferentes mantas filtrantes/drenantes utilizadas no experimento:

Tabela 4.5 - Características das mantas geotêxteis

Manta	XT-4	OP-20	OP-30	OP-40	OP-60
Permeabilidade					
Normal	$4 \cdot 10^{-1}$ cm/s	$2.2 \cdot 10^{-1}$ cm/s			
Transversal	$6 \cdot 10^{-1}$ cm/s	$6.0 \cdot 10^{-1}$ cm/s			
Espessura (*)	1.9 mm	1.9 mm	2.7 mm	3.5 mm	5.6 mm
Porosidade	93%	93%	92%	92%	91%
Abertura de filtração	140 $\mu$ m	130 $\mu$ m	114 $\mu$ m	90 $\mu$ m	59 $\mu$ m

(\*) Espessuras testadas para a pressão de 2,0 KPa

#### 4.4.4.2. Conjunto de leitos de secagem com mantas como meio drenante/filtrante

Realizou-se a simulação de um leito de secagem executado em um copo de becker com capacidade de quatro litros, o qual possuía uma torneira acoplada em sua base, fazendo

parte do sistema de drenagem do leito de secagem. Os leitos de secagem foram montados com uma camada drenante/filtrante constituída pelas diferentes mantas filtrantes e um sistema suporte formado por uma camada de 3 cm de areia com diâmetro de 1,0 mm, sob a qual estava a torneira existente na base do copo de becker. As mantas foram cor aparentetadas e costuradas de modo a revestir completamente as paredes do copo de becker, sendo após colocados sobre a camada de areia de diâmetro 1,0 mm. Foi necessário o preenchimento com argila o espaço existente entre o fundo do copo becker e a tubulação da torneira, a fim de evitar a acumulação do líquido filtrado/percolado da massa de lodo. A argila utilizada foi revestida por uma película fina de plástico antes de ser colocada no fundo do copo becker, para evitar a liberação de qualquer material que pudesse ser carregado com a passagem do líquido filtrado/percolado do lodo.

Resultou um conjunto de seis copos de becker, que foram identificados da seguinte forma:

Tabela 4.6 - Identificação dos leitos de secagem com meio drenante/filtrante composto por mantas geotêxteis

Leito de secagem	Tipo de manta
<b>Leito 1</b>	Sem manta
<b>Leito 2</b>	XT - 4
<b>Leito 3</b>	OP - 20
<b>Leito 4</b>	OP - 30
<b>Leito 5</b>	OP - 40
<b>Leito 6</b>	OP - 60

O ensaio foi realizado com a aplicação de um volume de quatro litros de lodo sobre as mantas filtrantes de cada leito (copo becker + mantas). O líquido filtrado/percolado foi coletado em um reservatório (copo de becker com capacidade de 1 litro), para posteriores análises dos diferentes parâmetros, em procedimento similar ao realizado nas etapas anteriores deste estudo.

A figura 4.5 em seqüência, apresenta o esquema da montagem dos leitos de secagem com meio drenante/filtrante composto por mantas.

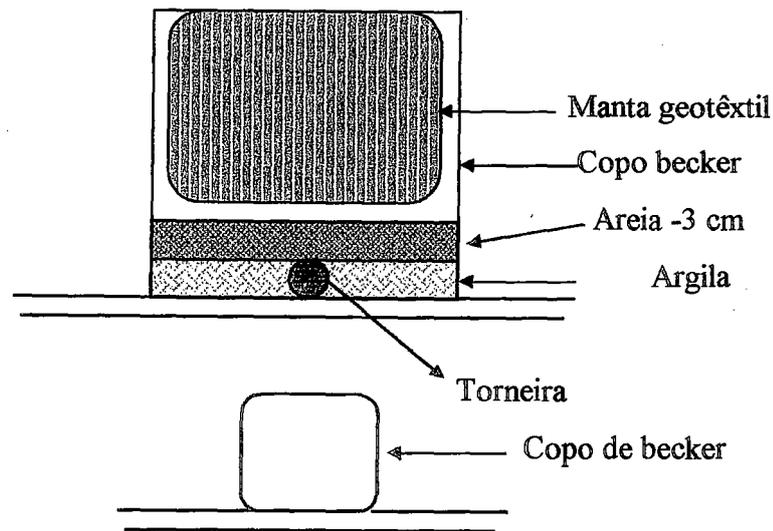


Figura 4.5 - Esquema do leito de secagem com mantas geotêxteis

Todo o volume de líquido percolado do lodo neste experimento foi armazenado em galões e acondicionado em refrigeração até o momento de sua utilização no **Experimento 4**, onde foi estudada a utilização de composto orgânico no polimento final deste efluente, antes de ser lançado no meio ambiente.

#### 4.4.3. Experimento 3

Nesse experimento, avaliou-se o comportamento do lodo de ETA, quando os leitos de secagem foram montados com camadas drenantes/filtrantes constituídas por areia e diferentes tipos de mantas geotêxteis.

Aproveitando o sistema de leitos de secagem montados no **Experimento 1**, renovou-se a areia, mantendo-se as mesmas espessuras, colocando-se a manta sobre a última camada desta. As mantas foram cortadas e costuradas de maneira a cobrir totalmente as paredes das colunas de leitos de secagem. Foram utilizadas apenas três tipos de mantas, a XT-4, OP-30 e OP-60, que abrangem todos os tipos testados anteriormente, distribuídas conforme tabela 4.7.

As amostras compostas eram separadas e armazenadas a medida que o volume filtrado/drenado fosse suficiente para as análises físico/químicas do item 4.3.

Tabela 4.7 - Esquema da distribuição das mantas geotêxteis nos leitos de secagem

Leito	Espessura da camada		
	drenante/filtrante de areia	Tipo de manta	Identificação do leito
<b>Leito 1</b>	16 cm	XT - 4	XT - 4/1
<b>Leito 2</b>	23 cm	OP - 30	OP - 30/2
<b>Leito 3</b>	30 cm	OP - 60	OP - 60/3
<b>Leito 4</b>	16 cm	OP - 60	OP - 60/4
<b>Leito 5</b>	23 cm	OP - 30	OP - 30/5
<b>Leito 6</b>	30 cm	XT - 4	XT - 4/6

As amostras compostas eram separadas e armazenadas a medida que o volume filtrado/drenado fosse suficiente para as análises físico/químicas do item 4.3.

#### 4.4.4. Experimento 4

Este experimento teve como finalidade, avaliar a influência do composto orgânico produzido no processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos, na atenuação do alumínio existente no percolado/filtrado dos leitos de secagem destinados à desidratação de lodos de ETA. Buscou-se com isto, estudar uma alternativa de disposição de líquidos com teores do metal alumínio, minorando os efeitos que o mesmo possa vir a causar quando lançado no ambiente sem um condicionamento/tratamento prévio.

O ensaio consistiu basicamente na aplicação de diferentes cargas de percolado dos leitos de secagem sobre o composto orgânico, observando-se a capacidade atenuadora deste material com respeito ao alumínio.

##### 4.4.4.1. Sistema de vasos com composto orgânico

O sistema foi composto por cinco vasos plásticos com capacidade de 7 litros, onde foi colocada uma quantidade de 5 kg de composto orgânico, cujas características estão apresentadas no item 4.2.2, tabela 4.9. Os vasos possuíam um sistema de drenagem constituído por um orifício ao fundo e uma mangueira plástica flexível acoplada ao mesmo, sendo o percolado coletado em copos becker com capacidade de 500 ml.

Inicialmente, antecedendo a aplicação do líquido ao alumínio, sobre o composto orgânico foi aplicada uma taxa única de água deionizada; no segundo momento, foram aplicadas então as cargas diferenciadas de filtrado/percolado dos leitos de secagem de lodo de ETA, que haviam sido separadas quando da realização **Experimento 2**, para utilização nesta etapa do estudo.

O experimento foi, assim, subdividido em duas etapas distintas:

- 1) aplicação de uma taxa de 150 ml/dia de água deionizada em cada vaso com composto orgânico, sendo analisados no líquido lixiviado, os parâmetros referidos no item 4.3. A taxa de aplicação representa a lâmina pluviométrica da cidade de Porto Alegre, sobre a área superficial dos vasos. O período de aplicação foi estendido até a obtenção de um número razoável de amostras compostas. A princípio, havia sido estabelecido um período de 15 dias de observação; no entanto, foi necessário um período maior, devido a necessidade de umedecer-se a massa de composto orgânico, atingindo-se a capacidade de campo e gerando o lixiviado. O período de aplicação de água deionizada foi de 27 dias;
- 2) aplicação de diferentes taxas de líquido filtrado/percolado dos leitos de secagem com mantas geotêxteis como meio drenante/filtrante sobre o composto orgânico de cada vaso, mantendo-se em um dos vasos a aplicação de água deionizada, por um período de 15 dias.

A tabela 4.8 apresenta as taxas aplicadas sobre o composto orgânico.

Tabela 4.8 -Taxas de aplicação do percolado dos leitos de secagem sobre o composto orgânico.

Vaso com composto orgânico	Taxa de aplicação do percolado (ml/dia)
1 (água deionizada)	150
2	150
3	200
4	250
5	300

A figura 4.6 apresenta a forma esquemática dos vasos com composto orgânico e a sistema de coleta do percolado.

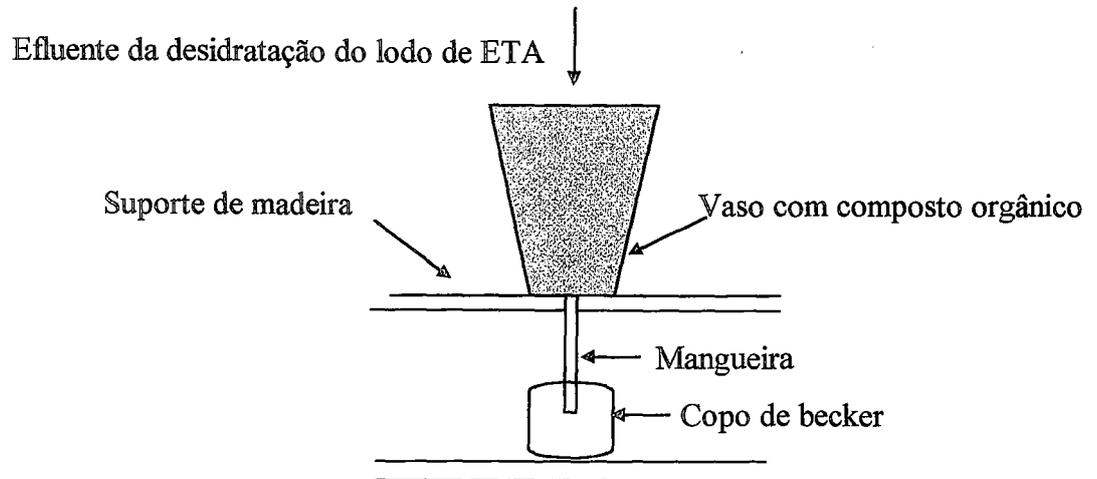


Figura 4.6 - Esquema dos vasos com composto orgânico

Foram realizadas com o líquido lixiviado do composto orgânico, as análises referidas no item 4.3, tanto na fase de aplicação da água deionizada como na fase de aplicação de diferentes taxas de percolado de lodo de ETA resultante na desidratação em leitos de secagem com mantas como camada drenante/filtrante.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. 1.Experimento 1 - Fase 1

Neste experimento, foi monitorizado o comportamento do lodo de ETA quando disposto em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia. Utilizou-se dois tipos de lodo, cujas principais diferenças foram as condições de armazenamento e o tempo transcorrido entre a coleta e sua aplicação nos leitos. Identificou-se os lodos utilizados da seguinte forma:

- a) Lodo velho: lodo armazenado em bombonas de 50 L, aplicado nos leitos depois de 30 dias de armazenamento em condição natural, sem refrigeração;
- b) Lodo novo: lodo armazenado em bombonas de 20 L, mantido sobre refrigeração por um dia, até o momento de aplicação nos leitos de secagem.

#### 5.1.1. Desidratação do lodo velho

Aplicou-se sobre os leitos de secagem com diferentes espessuras do meio drenante/filtrante de areia, um volume de 2,4 L de lodo, cor aparente respondente a uma camada de lodo de 30 cm de espessura.

##### 5.1.1.1.1.Lodo

A interface sólido/líquido formou-se em um período de 1 hora. O lodo flutuou espontaneamente no sétimo dia após a aplicação do lodo nos leitos, não ocorrendo esse fenômeno por completo em todos os leitos. A flotação completa do lodo foi observada somente no Leito 1 (meio drenante/filtrante de espessura de 16 cm), enquanto no Leito 3 (espessura do meio drenante/filtrante de 30 cm), ocorreu flotação parcial.

Os volumes de líquido drenados diariamente dos leitos foram extremamente pequenos, como se pode verificar nas tabelas A1 a A6 em anexo, ocorrendo o mesmo em todos os leitos de secagem estudados, independentemente da espessura do meio drenante/filtrante. A maior parte do volume total drenado ocorreu após a flotação do lodo, que facilitou a

passagem do líquido pelo meio drenante/filtrante. Após a flotação, verificou-se uma mudança brusca nos parâmetros físico/químicos analisados, principalmente cor aparente e turbidez. No Leito 1, com flotação total, a cor aparente e a turbidez variaram de 400 mgPt/L para 3.000 mgPt/L, e de 40 UNT para 47 UNT, respectivamente (figuras B4 e B5, anexo B).

A duração do período de secagem do lodo foi de 30 dias, resultando uma massa com aproximadamente 80 % de umidade, ou concentração de sólidos totais de 20 %. Em todos os leitos a umidade da massa de lodo desidratada foi praticamente a mesma, independentemente da espessura da camada drenante/filtrante de areia (figuras 5.1 e 5.2).

Os resultados obtidos nas análises realizadas no lodo antes de sua disposição nos leitos de secagem, e após o período experimental, são apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2, em seqüência.

Tabela 5.1. Características do lodo bruto, no momento de sua disposição nos leitos de secagem

Parâmetros	Valores observados
Umidade(%)	96,50
Sólidos totais(%)	3,50
Sólidos totais fixos(%)	2,48
Sólidos totais voláteis(%)	1,02
Al <sup>+3</sup> (%)	5,90
Al <sup>+3</sup> (mg/L) (*)	1.500

(\*) Com exceção para Al<sup>+3</sup> (mg/L), os demais resultados foram expressos em base seca 105-110 °C.

Tabela 5.2. Características do lodo desidratado, em cada leito, ao final da experimentação

Parâmetros	Leito 1	Leito 2	Leito 3
Umidade(%)	79,30	83,31	87,10
Sólidos totais(%)	20,70	16,69	12,90
Sólidos totais fixos(%)	7,12	11,83	9,38
Sólidos totais voláteis(%)	13,58	4,86	3,52
Al <sup>+3</sup> (%) (*)	5,10	4,80	5,70

(\*) Resultados expressos em base seca 105-110 °C



Figura 5.1 – Desidratação do lodo velho em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia

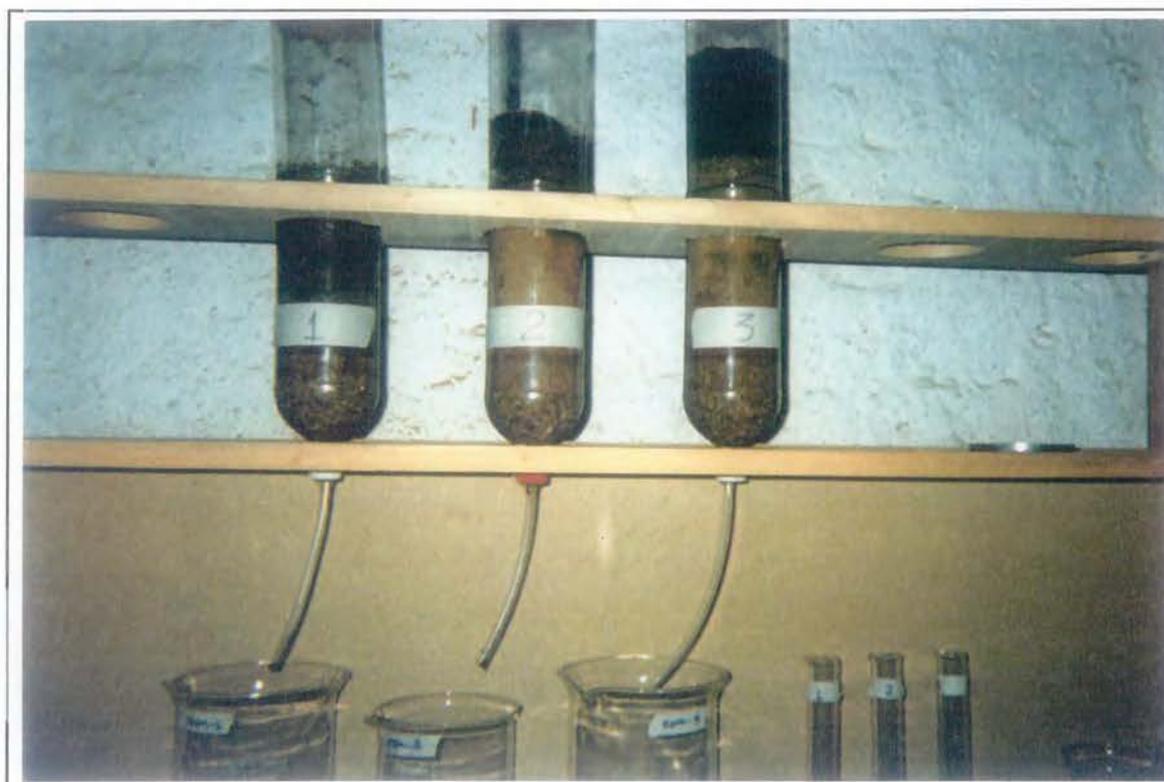


Figura 5.2 – Lodo velho desidratado em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia

Para a aplicação de uma camada inicial de 30 cm de espessura de lodo bruto, observou-se ao final desta fase do experimento, camadas de lodo desidratado de 7, 9 e 11 cm de espessura, para os Leitos 1, 2 e 3, respectivamente, o que mostra uma redução de volume para aproximadamente um terço do volume inicial aplicado sobre os leitos originalmente. O lodo desidratado mostrou-se gelatinoso.

#### 5.1.1.1.2. Percolado

A concentração de alumínio na massa de lodo (em base seca) foi de 5,9 %, ou 59.000 mg/kg, que se manteve praticamente constante, após a desidratação. Este fato explica a pequena carga de alumínio contida no líquido drenado da massa de lodo, onde observou-se uma carga máxima de 1,4827 mg (figura B2, anexo B).

A carga de DQO do lodo bruto foi 24.576 mgO<sub>2</sub>, para uma concentração de 10.240 mgO<sub>2</sub>/L, enquanto a carga de DQO do percolado foi de 935 mgO<sub>2</sub> para o Leito 1 (espessura do meio drenante/filtrante de 16 cm), 865 mgO<sub>2</sub> para o Leito 2 (espessura do meio drenante/filtrante de 23 cm) e de 423 mgO<sub>2</sub> para o Leito 3 (espessura do meio drenante/filtrante de 30 cm); as cargas finais, correlacionadas à carga do lodo bruto, permitem estabelecer-se uma retenção de DQO de 96,2 %, 96,5 % e 98,5 %, respectivamente, para os leitos estudados (figura B3, anexo B).

O valor relativamente baixo do pH do percolado no início do experimento, tendeu a se elevar durante a experimentação em todos os leitos de secagem, com valores iniciais próximos de 5,0 e finais em patamares superiores a 6,0 (figura B6, anexo B).

A turbidez do percolado foi diminuindo gradativamente no decorrer do experimento, ocorrendo o valor máximo de 40 UNT no Leito 1 (menor espessura do meio drenante/filtrante) e o valor mínimo de 7 UNT para o Leito 3 (maior espessura do meio drenante/filtrante). Não ocorreu o mesmo com a cor aparente do percolado, cujas concentrações foram aumentando no decorrer do experimento (figuras B4 e B5, anexo B).

A tabela 5.3 apresenta os valores máximos e mínimos dos diversos parâmetros físico/químicos analisados, e as cargas totais acumuladas de alumínio e DQO observadas no percolado dos leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia.

Tabela 5.3. Parâmetros físico/químicos analisados no percolado dos leitos de secagem

Espessura do meio drenante de areia	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg O <sub>2</sub> )	Cor aparente (mg/L Pt)	Turbidez (UNT)	pH	Volume total (L)
16 cm	1,3696	935	400-3000	16-47	5,2-6,1	1,354
23 cm	1,4827	865	300-2000	11-34	5,5-7,3	1,364
30 cm	0,9780	423	150-600	7-26	4,9-7,7	1,083

Pode-se verificar, através dos resultados obtidos, que a carga de alumínio no percolado é extremamente baixa, apresentando valores similares para todos os leitos de secagem estudados. Observou-se que quanto maior a espessura do meio drenante/filtrante, menores foram as concentrações de cor aparente e turbidez; com relação ao volume total percolado dos leitos, foi praticamente o mesmo para todos os leitos testados, com volumes totais de 1,35 L, 1,36 L, 1,08 L, para os Leitos 1, 2 e 3, respectivamente (figura B1, anexo B).

### 5.1.2. Desidratação do lodo novo

Nesta etapa, seguindo-se os mesmos procedimentos adotados na etapa anterior, após-se lodo novo nos leitos de secagem. Utilizou-se, no entanto, dois conjuntos de leitos de secagem, identificados conforme o item 4.3.2.1, de modo a se trabalhar sempre com um testemunho para cada unidade.

#### 5.1.2.1. Lodo

A disposição de um volume de 2,4 L de lodo com uma concentração de sólidos extremamente baixa, fez com que ocorresse a formação da interface sólido/líquido em um período inferior a 1 hora (figuras 5.3 e 5.4).

Os resultados obtidos nas análises realizadas no lodo antes e depois de sua disposição nos leitos de secagem, e após o período de experimentação, são apresentados nas tabelas 5.4 e 5.5 em seqüência.



Figura 5.3 – Desidratação do lodo novo em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia

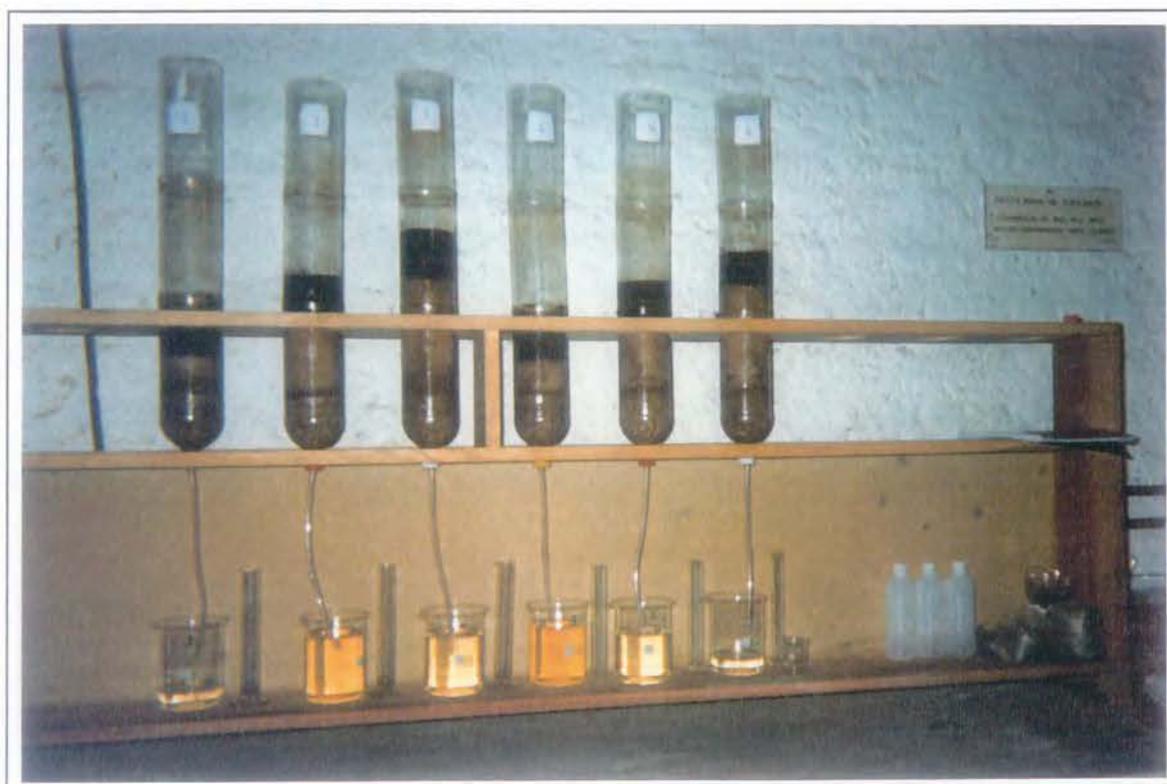


Figura 5.4 – Lodo novo desidratado em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia

Tabela 5.4. Características do lodo bruto novo, no momento de sua disposição nos leitos de secagem

Parâmetros	Valores observados
Umidade(%)	96,61
Sólidos totais(%)	3,39
Sólidos totais fixos(%)	0,08
Sólidos totais voláteis(%)	3,31
Al <sup>+3</sup> (mg/L) (*)	1.890

(\*) Com exceção para Al<sup>+3</sup> (mg/L), os demais resultados foram expressos em base seca 105-110 °C.

Tabela 5.5. Características do lodo desidratado em cada leito, ao final da experimentação

Parâmetros	Leito 1	Leito 2	Leito 3	Leito 4	Leito 5	Leito 6
Umidade(%)	79,89	77,60	83,23	81,82	75,34	77,08
Sólidos totais(%)	20,11	22,40	16,77	18,18	24,66	22,92
Sólidos totais fixos(%)	14,16	15,71	11,82	14,86	18,02	17,85
Sólidos totais voláteis(%)	5,95	6,69	3,45	3,32	6,64	5,07
Al <sup>+3</sup> (%) (*)	5,14	4,36	4,79	5,07	6,92	4,02

(\*) Resultados expressos em base seca 105-110 °C

Em análises de sólidos sedimentáveis realizadas em cone Imhoff, foram obtidos resultados em torno de 950 ml/L, caracterizando uma ótima capacidade de sedimentação. Estes valores já eram esperados, em vista se tratar de lodos de ETAs, com altas concentrações de agente floculante/coagulante e com decorrente grande capacidade de sedimentação. A proporção entre sólidos fixos e voláteis foi de 4:1, resultado característico para esse tipo de resíduo, que contém uma grande quantidade de material inerte em relação a matéria orgânica.

Nesta etapa da pesquisa, com a utilização de lodo novo, não foi observada a formação espontânea de flotação durante o experimento, permanecendo durante a fase de desidratação uma interface líquido/sólido, com a diminuição gradativa do volume do sobrenadante, a medida que a drenagem do líquido através do meio drenante/filtrante de areia se processava. O comportamento do lodo foi semelhante nas seis colunas de leitos de secagem estudadas, independentemente da espessura do meio drenante de areia; porém, observou-se volumes maiores de percolado nos Leitos 5 e 6. Nestes mesmos leitos, em apenas seis dias praticamente todo o líquido da massa de lodo havia drenado - 1,89 L e 1,90 L - respectivamente, com o

desaparecimento da interface líquido/sólido a partir desse momento.

A fase de desidratação do lodo novo foi completada em 14 dias, quando praticamente todo o líquido havia sido drenado. A desidratação resultou em uma massa de lodo com umidade média da ordem de 79 %, ou concentração de sólidos totais de 21 % (figura B7, anexo B).

#### 5.1.1.2.2. Percolado

As concentrações dos parâmetros analisados tiveram um variação intensa durante o fase de desidratação, principalmente em termos de cor aparente e turbidez do percolado. Observou-se, no Leito 4, uma maior variação da concentração de cor aparente, entre 30 e 400 mgPt/L, e no Leito 3, com a turbidez variando de 0,8 a 18 UNT, com os maiores resultados ocorrendo na fase final de desidratação do lodo (figuras B10 e B11, anexo B).

Os valores de pH do percolado tiveram um comportamento semelhante aos verificados quando estudou-se lodo velho, com valores iniciais próximos 5,0 , e finais entre 6,5 a 6,9; nesta etapa, o lodo bruto, no momento de aplicação, apresentou pH igual a 6,1 (figura B12, anexo B).

A tabela 5.6 apresenta os valores máximos e mínimos dos diversos parâmetros físico/químicos analisados, e as cargas totais acumuladas de alumínio e DQO observadas no percolado dos leitos de secagem com meio drenante de areia.

Tabela 5.6. Parâmetros físico/químicos analisados no percolado dos leitos de secagem

Leito de secagem com meio drenante de areia	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO (mg O <sub>2</sub> )	Cor aparente (mg/l Pt)	Turbidez (UNT)	pH	Volume total (L)
Leito1	0,6478	130	30-150	1,1-14	4,6-6,9	1,82
Leito2	0,6999	198	40-150	0,8-8,0	5,8-6,4	1,82
Leito3	0,7127	115	30-150	0,8-18	5,7-6,5	1,73
Leito4	0,7852	169	30-400	0,9-18	4,4-6,4	1,80
Leito5	0,6347	132	30-150	0,7-7,0	6,0-6,9	1,89
Leito6	0,6445	127	30-150	1,2-14	5,9-6,9	1,90

A carga de DQO do lodo bruto foi de 4.665 mgO<sub>2</sub>, para uma concentração de 1.944 mgO<sub>2</sub>/L, enquanto a carga de DQO do percolado manteve-se entre 115 a 198 mgO<sub>2</sub>, representando uma remoção de 97,5 % e 95,7 %, respectivamente (figura B9, anexo B).

A carga de alumínio nos percolados foi extremamente baixa, de 0,63 a 0,80 mgAl<sup>3+</sup>, apesar de no lodo bruto, resultar uma carga de alumínio de 4.536 mg Al<sup>3+</sup>, para uma concentração de 1.890 mg/L (figura B8, anexo B).

## **5.1.2. Experimento 1 - Fase 2**

### **5.1.2.1. Solubilização/lixiviação do metal pesado alumínio, a partir de lodos de ETAs desidratados em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia de diferentes espessuras, e submetidos à sistemática de rega por soluções ácidas**

As soluções ácidas foram aplicadas sistematicamente sobre o lodo novo desidratado resultante do **Experimento 1 - Fase 1**.

A fase de desidratação teve a duração de 14 dias, resultando uma concentração média de sólidos de 20 % na massa de lodo. Conforme descrito no item 4.4.2, utilizou-se soluções ácidas em três níveis de pH, que foram 6,5, 5,0 e 2,5, respectivamente, com a aplicação diária de 26 ml de solução, 15 dias para cada solução.

#### **5.1.2.1.1. Aplicação das soluções ácidas**

Após a aplicação das soluções ácidas sobre o lodo desidratado, realizaram-se análises de diferentes parâmetros físico/químicos nos líquidos percolados dos leitos, verificando-se os resultados a seguir.

##### **5.1.2.1.1. pH**

Observou-se ao longo do experimento, que o pH permaneceu em níveis semelhantes à fase de desidratação (tabelas A19 a A24, anexo A), mesmo depois da aplicação da solução com pH 2,5. Os valores do pH do lixiviado em todos os leitos variaram entre 5,2 e 6,5; observe-se que os valores verificados nas últimas amostras de percolados dos leitos de

secagem na fase de desidratação, estiveram entre 5,0 e 6,9, de modo que as variações após a aplicação das soluções ácidas, foram extremamente pequenas. O fato do pH do percolado permanecer nos mesmos valores da fase de desidratação, possivelmente deveu-se à lixiviação de compostos alcalinos carregados da camada superficial do lodo desidratado.

#### 5.1.2.1.1.2. Alumínio

A carga de alumínio foi diminuindo gradativamente, independentemente do pH da solução aplicada sobre o lodo desidratado, demonstrando a ligação forte deste com as partículas orgânicas e inorgânicas constituintes da massa de lodo desidratado.

Antes da aplicação da solução de pH 6,5 (água potável), foi verificada a quantidade de alumínio presente na água potável, constatando-se que a concentração do metal, se presente, estava em níveis não detectáveis pelo procedimento analítico de laboratório (digestão com ácido nítrico, e leitura em espectrofotômetro de absorção atômica).

O decréscimo da carga de alumínio nos percolados dos leitos durante a aplicação da diferentes soluções ácidas pode ser observada na tabela 5.7 e na figura 5.5 .O volume das amostras coletadas variou entre 50 a 70 ml (tabelas A19 a A54, anexo A).

Tabela 5.7. Carga de alumínio total (mg) observada nas amostras compostas de percolado dos leitos, analisadas durante a aplicação das soluções ácidas

Solução	Dia da coleta	Leito 1	Leito 2	Leito 3	Leito 4	Leito 5	Leito 6
Solução pH 6,5	01	ND	ND	ND	0,0379	0,0714	0,0038
	05	0,0102	0,0159	0,0173	0,0113	0,0061	0,0135
	09	0,0078	0,0155	0,0119	0,0165	0,0138	0,0156
	16	0,0090	0,0520	0,0061	0,0123	0,0615	0,0071
Solução pH 5,0	17	0,0106	0,0092	0,0142	0,0114	0,0110	0,0215
	21	0,0172	0,0241	0,0289	0,0355	0,0315	0,0285
	25	0,0209	0,0306	0,0222	0,0042	0,0073	0,0096
	30	0,0054	0,0093	0,0057	0,0054	0,0064	0,0053
	32	0,0035	0,0044	0,0037	0,0048	0,0057	0,0052
Solução pH 2,5	33	0,0056	0,0153	0,0074	ND	0,0058	0,0094
	37	ND	0,0094	ND	ND	0,0055	ND
	38	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	41	0,0156	0,0238	ND	0,0178	0,0069	ND
	46	0,0084	0,0565	0,0265	0,0263	0,0112	0,0138

ND – não detectável

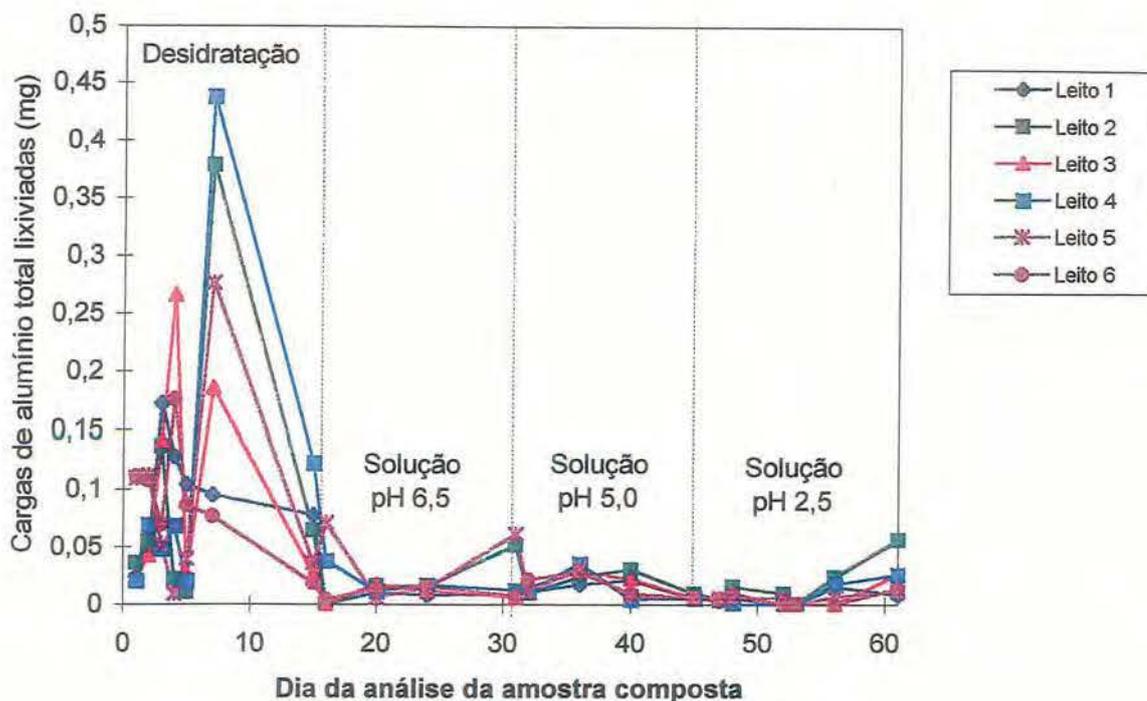


Figura 5.5 – Carga de alumínio total observada no percolado durante a experimentação

A carga de alumínio total lixiviada ao longo do experimento foi extremamente baixa, com o valor máximo ocorrendo no Leito 3, com a aplicação da solução com pH 5,0. As cargas totais de alumínio obtidas em cada leito nas fases de desidratação e aplicação das diferentes soluções ácidas, são as constantes da tabela 5.8.

Tabela 5.8. Carga de alumínio total (mg) observada durante as fases de desidratação e aplicação das diferentes soluções ácidas

Fase	Leito 1	Leito 2	Leito 3	Leito 4	Leito 5	Leito 6
Desidratação	0,6478	0,6999	0,7127	0,7852	0,6347	0,6445
Solução pH 6,5	0,2700	0,0366	0,0353	0,0780	0,0331	0,0400
Solução pH 5,0	0,0576	0,0776	0,0745	0,0613	0,0619	0,0701
Solução pH 2,5	0,0297	0,1052	0,0339	0,0443	0,0294	0,0232
Total	0,7621	0,9193	0,8565	0,9688	0,7591	0,7778

Comparando-se as cargas totais lixiviadas com as cargas apostas nos leitos, comprova-se que as cargas de alumínio perdidas para o ambiente são extremamente baixas, em um volume médio total coletado de 1,1 L.

### **5.1.2.1.1.3. Cor aparente e turbidez**

As concentrações de cor aparente e turbidez foram decrescendo ao longo do experimento, iniciando com valores de 300 mgPt/L e 3 UNT, respectivamente, finalizando com valores de 10 mgPt/L e 0,8 UNT, ocorrendo estes últimos valores para praticamente todos os lixiviados.

Em algumas amostras de lixiviado foram realizadas análises de DQO, verificando-se pequenas concentrações de matéria orgânica nos líquidos percolados ao longo do experimento; estes valores situaram-se entre 23 e 121 mgO<sub>2</sub>/L. Paralelamente, ocorreu o decréscimo gradativo das concentrações de cor aparente e turbidez.

## **5.2. Experimento 2**

### **5.2.1. Desidratação do lodo de ETA em leitos de secagem com meio drenante/filtrante constituído por mantas geotexteis não tecidas**

Nesta etapa, foi disposto um volume de 4 L de lodo novo nos leitos de secagem cujo meio drenante/filtrante era composto por mantas geotexteis não tecidas de diferentes espessuras. O conjunto dos leitos de secagem está descritos no item 4.5, com uma unidade testemunha (branco) sem manta (figuras 5.6 e 5.7).

#### **5.2.1.1. Lodo**

A desidratação do lodo ocorreu em um período extremamente curto, de 72 h. Imediatamente após a aplicação do lodo sobre as mantas, iniciou-se espontaneamente a drenagem do líquido da massa de lodo. Observou-se nos primeiros 30 min, um volume total médio de 600 ml de percolado (figura B13, anexo B).

Os resultados obtidos nas análises realizadas no lodo antes de sua disposição nos leitos de secagem, e após o período de experimentação, são apresentados na tabelas 5.9 e 5.10 em seqüência.



Figura 5.6 – Vista geral dos Experimentos 2 e 3



Figura 5.7 – Lodo desidratado em leitos de secagem com meio drenante/filtrante constituídos por mantas geotêxteis

Tabela 5.9. Características do lodo bruto, no momento de sua disposição nos leitos de secagem

Parâmetros	Valores observados
Umidade(%)	97,72
Sólidos totais(%)	2,28
Sólidos totais fixos(%)	1,52
Sólidos totais voláteis(%)	0,76
Al <sup>+3</sup> (mg/L) (*)	1.675

(\*) Com exceção para Al<sup>+3</sup> (mg/L), os demais resultados foram expressos em base seca 105-110 °C.

Tabela 5.10. Características do lodo desidratado, em cada leito, ao final da experimentação

Parâmetros	Branco	Mantas				
		XT-4	OP-20	OP-30	OP-40	OP-60
Umidade(%)	86,34	85,20	84,79	85,27	85,44	86,13
Sólidos totais(%)	13,66	14,80	15,21	14,73	14,56	13,87
Sólidos totais fixos(%)	9,35	10,20	10,43	9,98	9,90	9,35
Sólidos totais voláteis(%)	4,31	4,60	4,77	4,74	4,66	4,52
Al <sup>+3</sup> (%) (*)	4,46	5,11	5,55	6,16	6,34	6,16

(\*) Resultados expressos em base seca 105-110 °C

Observou-se no leito de secagem com manta geotêxtil de maior espessura, do tipo OP-60, a drenagem de um volume maior de percolado do que nas mantas de menor espessura, em um mesmo período de tempo. No leito no qual não foi utilizada a manta geotêxtil como meio drenante/filtrante, foi necessário um período 120 h para a completar a drenagem do líquido da massa de lodo, correspondendo um volume total percolado de 2,789L.

A umidade média do lodo desidratado para todos os leitos estudados foi de 85,5 %, relativamente alta; considerando-se o experimento anterior, verifica-se que as umidades médias resultaram ao redor de 80 % na massa de lodo, mas após um período de desidratação entre 14 e 30 dias, excessivamente longo se comparado às 72 horas necessárias nesta etapa. Já, no leito “branco”, resultou uma umidade da ordem de 86 %, em função da inexistência (apenas uma camada de areia de 3 cm) de um meio drenante/filtrante que facilitasse a operação; inclusive, verificou-se a passagem de lodo bruto para o recipiente de coleta. Na medida em que ocor aparentereu a sedimentação do lodo sobre a pequena camada de areia, a vazão do percolado

diminuiu, com o decréscimo nas concentrações de cor aparente e turbidez, de maneira que os valores dos parâmetros analisados do percolado tornavam-se cada vez mais próximos aos obtidos nos percolados dos outros leitos de secagem com mantas filtrantes/drenantes de diferentes espessuras. Nos leitos com meio drenante/filtrante de mantas do tipo XT-4 e OP-20 ocorreu a passagem de uma pequena quantidade de sólidos através das mesmas. Com base nestas observações, evidenciou-se a necessidade de uma espessura mínima da camada drenante/filtrante nos leitos de secagem, de maneira a impedir que ocorra a fuga de grande parte dos sólidos contidos no lodo bruto.

#### **5.2.1.2. Percolado**

Os parâmetros físico/químicos analisados no percolado dos leitos estão nas tabelas A55 a A60. Durante a fase de desidratação do lodo, a cor aparente do percolado apresentou concentrações que variaram de 1.000 mgPt/L no início da drenagem para 60 mgPt/L ao final desta, resultados esses obtidos para o leito com manta do tipo OP-40. No caso do leito sem manta drenante/filtrante inicialmente observou-se uma concentração de cor aparente de 20.000 mgPt/L, que diminuiu para 1.000 mgPt/L na última amostra de percolado coletada (figura B16, anexo B).

Os valores de turbidez do percolado de todos os leitos foram diminuindo gradativamente, no desenrolar do experimento, com um máximo de 125 UNT para o leito com manta do tipo XT-4, e um mínimo 5,7 UNT para o leito com manta do tipo OP-40 (figura B17, anexo B).

A tabela 5.11 apresenta os resultados máximo e mínimo dos parâmetros físico/químicos analisados, e as cargas totais acumuladas de alumínio e DQO observadas no percolado dos leitos de secagem com meio drenante/filtrante constituído por mantas geotêxteis. Esta tabela expressa os resultados constantes das tabelas A55 a A60, anexo A.

Constata-se que cargas de alumínio no percolado dos diferentes leitos de secagem foram extremamente baixas quando comparadas com a carga do lodo bruto de 6.700 mg de  $Al^{+3}$  total (concentração de 1.675 mg/L, volume de 4,0 L), figura B14, anexo B.

Tabela 5.11. Parâmetros físico/químicos analisados no percolado dos leitos de secagem

Tipo de meio drenante	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg O <sub>2</sub> )	Cor aparente (mgPt/L)	Turbidez (UNT)	pH	Volume total (L)
Sem manta (branco)	121,80	1072	800-20.000	50-1700	3,8-4,6	2,789
Manta XT-4	0,9830	335	100-1.000	6,5-125	4,1-5,4	2,678
Manta OP-20	0,9494	311	80-1.000	7,0-110	4,2-4,5	2,707
Manta OP-30	0,9425	333	150-1.000	17-110	4,2-4,4	2,775
Manta OP-40	0,6979	341	60-1.000	5,7-105	4,1-4,5	2,890
Manta OP-60	1,0417	308	200-1.000	18-90	4,2-4,5	3,120

A carga de DQO do lodo bruto foi de 40.100 mgO<sub>2</sub> (concentração de 10.025 mg/L, volume de 4,0 L); nos percolados, foi baixa, com um máximo de 341 mgO<sub>2</sub> para o leito com manta do tipo OP-40 e um mínimo de 308 mgO<sub>2</sub> para o leito com manta do tipo OP-60, o que representa remoções de 99,1% e 99,2%, respectivamente. No leito sem manta drenante/filtrante, a carga de DQO foi alta, resultando um total acumulado de 1072 mgO<sub>2</sub>.(figura B15, anexo B)

Relativamente ao pH, este manteve-se em níveis ao redor de 4,0, durante todo o experimento, independentemente do tipo de manta drenante/filtrante utilizada (figura B18, anexo B).

### 5.3. Experimento 3

#### 5.3.1. Desidratação do lodo de ETA em leitos de secagem com meio drenante/filtrante composto por areia e mantas geotêxteis

Neste experimento, montou-se leitos de secagem com diferentes espessuras do meio drenante/filtrante de areia e mantas geotêxteis, com o objetivo de avaliar a eficiência da operação de desidratação e a qualidade do percolado frente a um meio misto, constituído por ambos (figuras 5.8 e 5.9).

Foi disposto um volume de 2,4 L de lodo bruto em cada leito, o qual correspondeu a uma espessura de 30 cm de lodo. As características do lodo bruto utilizado neste experimento estão apresentadas na tabela 5.23, já que tratava-se do mesmo material coletado para a realização do **Experimento 2**. Durante cinco dias foram monitorizados os parâmetros físico/químicos já anteriormente estudados nos outros experimentos.



Figura 5.8 – Ensaio de sólidos sedimentáveis em Cone Imhoff (ao lado)

Figura 5.9 – Vista geral dos Experimentos 2, 3 e 4 (abaixo)



### 5.3.1.1. Lodo

Logo após a disposição do lodo nos leitos de secagem, iniciou-se a drenagem do líquido da massa do mesmo. Durante os primeiros 20 minutos, verificou-se a drenagem de um volume muito grande, 900 ml, no leito com meio drenante/filtrante de areia de 16 cm e manta do tipo XT-4, equivalente a 42 % do volume total percolado (tabela A67, anexo A); resultado similar ocorreu no leito com o mesmo tipo de manta, porém com a espessura do meio drenante/filtrante de areia de 30 cm, com a drenagem de 700 ml, equivalente a 34,7 % do volume total percolado (tabela A72, anexo A).

No final do segundo dia, praticamente todo volume de líquido da massa de lodo havia drenado, resultando nesta uma umidade média em torno de 78 %, considerando-se todos os leitos de secagem.

A tabela 5.12 apresenta os resultados obtidos nas análises realizadas no lodo após o período de experimentação.

Tabela 5.12. Características do lodo desidratado, em cada leito, ao final da experimentação

Parâmetros	XT-4/1	OP-20/2	OP-60/3	OP-60/4	OP-30/5	XT-4/6
Umidade(%)	75,34	78,32	79,54	78,88	81,75	78,48
Sólidos totais(%)	24,66	21,68	20,46	21,12	18,25	21,52
Sólidos totais fixos(%)	16,18	14,56	13,18	14,05	11,73	14,08
Sólidos totais voláteis(%)	8,48	7,12	7,28	7,07	6,52	7,44
Al <sup>+3</sup> (%) (*)	6,08	7,05	7,49	7,49	6,96	6,60

(\*) Resultados expressos em base seca 105-110 °C

Obs.: A identificação do leito de secagem considera o tipo de manta e o leito drenante/filtrante de areia, conforme já descrito nos experimentos anteriores.

### 5.3.1.2. Percolado

As concentrações de turbidez foram altas nos primeiros 20 minutos do experimento, variando de 44 UNT no leito OP-60/3, para 78 UNT no leito OP-60/4; com o decorrer do tempo, a tendência observada foi de decréscimo nas concentrações, verificando-se ao final da desidratação, 1,5 UNT para os leitos OP-60/3 e XT-4/6. A cor aparente do percolado manteve

comportamento similar ao da turbidez, apresentando concentrações altas, em torno de 300 mgPt/L ao início da desidratação do lodo, nos leitos XT-4/1, OP-60/4 e OP-30/5; e 40 mgPt/L, em todos os leitos estudados, ao final da experimentação (figura B22, anexo B).

O pH do percolado apresentou o mesmo comportamento observado no Experimento 2, onde utilizou-se somente mantas geotêxteis como meio drenante/filtrante, mantendo-se no intervalo 4,0 e 5,0; ressaltou-se que o pH do lodo bruto foi 6,0. Isto pode explicar-se pelo fato de a massa de lodo desidratado reter a alcalinidade retirada inicialmente da água bruta, mantendo-a na massa de lodo desidratada (figura B24, anexo B).

A tabela 5.13 apresenta as concentrações máximas e mínimas dos parâmetros físico/químicos analisados, e as cargas totais acumuladas de alumínio e DQO observadas nos percolados dos leitos de secagem com meio drenante/filtrante constituído por areia e mantas geotêxteis.

Tabela 5.13. Parâmetros físico/químicos analisados no percolado dos leitos com areia e mantas geotêxteis

Tipo de meio drenante	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg O <sub>2</sub> )	Cor aparente (mg/l Pt)	Turbidez (UNT)	pH	Volume total (L)
XT-4/1	0,5775	199	40-300	3,0-64	4,2-4,4	2,135
OP-30/2	0,5595	167	40-200	2,8-52	4,1-5,1	2,090
OP-60/3	0,5100	143	20-150	1,4-44	4,9-5,9	2,015
OP-60/4	0,4552	218	40-300	2,2-78	4,2-4,8	2,000
OP-30/5	0,3916	169	40-300	3,2-67	4,3-4,9	1,865
XT-4/6	0,5006	169	40-200	1,5-56	4,6-5,3	2,075

A carga de alumínio no percolado foi extremamente baixa, independentemente da espessura do meio drenante de areia e do tipo de manta utilizada. Nas últimas amostras de percolado analisadas, feitas cinco dias após a aplicação do lodo nos leitos de secagem, não foi detectado o alumínio em cinco dos seis leitos estudados; o leito XT-4/1 apresentou uma carga baixa, 0,0132 mg (concentração de 0,330 mg/L, volume de 40 ml), figura B20, anexo B.

A carga de DQO do lodo bruto foi de 24.060 mgO<sub>2</sub> (concentração de 10.025 mg/L, volume de 2,4 L); nos percolados, foi baixa, com um máximo de 218,2 mgO<sub>2</sub> para o leito OP-60/4 e um mínimo de 143,4 mgO<sub>2</sub> para o leito OP-60/3, o que representa remoções de 99,0 % e 99,4 %, respectivamente (figura B21, anexo B).

O maior volume de líquido drenado foi quantificado no leito XT-4/1, com espessura do meio drenante/filtrante de areia de 16 cm e com manta do tipo XT-4, possivelmente devido a maior facilidade da passagem do líquido por esse tipo de meio. O menor volume de líquido drenado foi observado no leito OP-30/5, com espessura do meio drenante/filtrante de areia com 23 cm e manta geotêxtil do tipo OP-30 (figura B19, anexo B).

## **5.4. Experimento 4**

### **5.4.1. Polimento do efluente da desidratação do lodo de ETA em leitos de secagem com a utilização de composto orgânico**

Esse experimento foi dividido em duas etapas distintas: na primeira, aplicou-se água deionizada sobre recipientes contendo composto orgânico; e, na segunda, aplicou-se sobre o mesmo composto orgânico e nos mesmos recipientes, percolado resultante da desidratação de lodo de ETA, do **Experimento 2** (figura 5.15).

Os resultados obtidos nas análises realizadas no lixiviado do composto orgânico com a aplicação de água deionizada e em um segundo momento, com a aplicação de diferentes taxas de percolado dos leitos de secagem do **Experimento 2**, são apresentados nas tabelas A79 a A83, no Anexo A.

#### **5.4.1.1. Fase de aplicação de água deionizada**

Inicialmente, foi aplicado diariamente um volume de água deionizada de 150 ml, estabelecido a partir da área superficial dos recipientes que continham o composto orgânico e da altura pluviométrica média anual da cidade de Porto Alegre/RS, que é 1.200 mm/ano. A aplicação da água deionizada teve duas finalidades principais:

- saturação do composto orgânico;
- a verificação da lixiviação do alumínio contido no composto orgânico.

Durante esta fase pode-se observar que os parâmetros físico/químicos analisados no lixiviado do composto orgânico apresentaram em níveis relativamente iguais nos cinco vasos de composto orgânico monitorados.

#### 5.4.1.1.1. Cor aparente, turbidez e DQO

No início da aplicação da água deionizada, verificou-se concentrações altas de cor aparente e turbidez, tendendo a diminuir ao longo do experimento, mas voltando a aumentar ao final da aplicação da água deionizada. Ocorreu o mesmo com a DQO, cujas concentrações variaram de 99 mgO<sub>2</sub>/L a 232 mgO<sub>2</sub>/L, correspondendo a cargas de 159mgO<sub>2</sub> e 235mgO<sub>2</sub>, resultados mínimo e máximo para os cinco recipientes estudados.

#### 5.4.1.1.2. pH

O valor do pH do lixiviado permaneceu na faixa neutra, levemente alcalina, variando entre 7,3 a 8,0 em todos os vasos com composto orgânico monitorizados.

#### 5.4.1.1.3. Alumínio

A carga total de alumínio lixiviada do composto orgânico após a aplicação da água deionizada foi baixa e praticamente igual para todos os vasos com composto, com valores não superiores a 0,412 mgAl<sup>3+</sup>, conforme mostra a tabela 5.14.

Tabela 5.14. Carga de alumínio total (mg) observada no lixiviado durante a aplicação de água deionizada

Dia de coleta	Vaso 1	Vaso 2	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5
01	0,0378	0,0751	0,0473	0,0857	0,1379
02	0,0477	0,0133	0,0138	0,0222	0,0272
03	-	0,0682	0,0570	0,0806	0,0602
04	0,0222	0,0248	0,0225	0,0327	0,0166
05	0,0198	0,0347	0,0206	0,0397	0,0697
06	0,0297	0,0173	0,1980	0,0297	0,0260
07	0,0272	0,0698	0,0364	0,0639	0,0173
08	0,0742	0,0413	0,0643	0,0397	0,0394
09	0,0330	0,0314	0,0364	0,0017	0,0107
Carga total de alumínio (mg)	0,2916	0,3758	0,3181	0,4112	0,3750
Volume total coletado (L)	1,109	1,182	1,126	1,373	1,343

#### 5.4.1.2. Fase de aplicação de percolado dos leitos de secagem

Durante um período de 10 dias, aplicou-se taxas diferenciadas de percolado resultantes dos leitos de secagem do **Experimento 2**, sobre o composto orgânico. As amostras do lixiviado do composto orgânico foram coletadas diariamente, sendo armazenadas e conservadas para posteriores análises.

A tabela 5.15 apresenta as características do percolado aplicado sobre o composto orgânico

Tabela 5.15. Característica do percolado

Parâmetros	Valores observados
Alumínio ( mg/L )	0,748
DQO (mg/L)	45
Cor aparente (mgPt/L)	300
Turbidez (UNT)	65
pH	4,0

##### 5.4.1.2.1. Cor aparente e turbidez

As concentrações de cor aparente e turbidez mantiveram-se muito semelhante em todos os vasos com composto orgânico, independentemente da taxa de aplicação de percolado (tabelas A89 a A93, anexo A).

##### 5.4.1.2.2. pH

O pH do lixiviado manteve-se na faixa levemente alcalino, variando entre 8,0 e 8,4, enquanto o percolado aplicado sobre o composto apresentava um pH na faixa ácida, em patamares próximos a 4.

##### 5.4.1.2.3. DQO

As cargas totais de DQO nos percolados dos vasos diferenciaram-se entre si, sendo detectadas estatisticamente estas diferenças. Verificou-se o acréscimo da carga de DQO nos

percolados dos vasos, na medida do aumento da carga deste aplicada sobre o composto orgânico, embora a carga de DQO no percolado aplicado fosse relativamente baixa. A tabela 5.16 apresenta as cargas totais de DQO aplicadas e lixiviadas dos vasos com composto orgânico.

Tabela 5.16 . Carga total de DQO (mgO<sub>2</sub>) aplicada e lixiviada dos vasos com composto orgânico

Cargas de DQO (mgO <sub>2</sub> )	Vaso 1	Vaso 2	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5
Carga total de DQO aplicada	-	61	81	102	122
Carga total de DQO lixiviada	177	198	266	340	340

Pode-se verificar que as cargas totais de DQO lixiviadas dos vasos foram superiores as cargas de DQO aplicadas sobre o composto orgânico.

#### 5.4.1.2.4. Alumínio

Nas últimas amostras coletadas de lixiviado dos vasos, verificou-se um decréscimo na carga de alumínio a níveis de não detecção, em todos os vasos, reproduzindo o resultado do Vaso 1, no qual foi aplicada somente água deionizada.

A tabela 5.17 apresenta as cargas totais de alumínio lixiviadas durante a aplicação do percolado dos leitos de secagem.

Tabela 5.17. Carga de alumínio total (mg) observada durante a aplicação de percolado

Dia de coleta	Vaso1*	Vaso2	Vaso3	Vaso4	Vaso5
01	0,0297	0,0207	0,0347	0,0413	0,0513
02	0,0347	0,0456	0,0684	0,0321	0,0321
03	0,0198	0,0189	0,0272	0,0346	0,3960
04	0,0173	0,0397	0,0434	0,0354	0,0404
05	0,0189	0,0189	0,0280	0,0354	ND
06	ND	0,0331	ND	ND	ND
07	ND	ND	ND	0,0379	0,0420
08	ND	ND	ND	ND	ND
09	ND	ND	ND	ND	ND
Carga total de alumínio (mg)	0,1204	0,1769	0,2017	0,2167	0,2054
Volume total percolado (L)	0,965	0,975	1,455	1,840	2,100

- Aplicação de uma taxa de 150ml de água deionizada (ND – não detectado)

Os resultados obtidos nas análises realizadas no composto orgânico antes e após a aplicação de água deionizada e de percolado dos leitos de secagem, são apresentados na tabela 5.18.

Tabela 5.18. Concentração de alumínio (%) no composto orgânico nas diferentes fases de experimentação

Fase	Vaso 1*	Vaso 2	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5
Inicial	1,67	1,94	2,55	2,55	2,55
Após aplicação de água deionizada	1,76	1,76	2,29	3,70	4,05
Após aplicação de percolado	4,05	3,70	2,82	2,02	1,94

(\* ) Aplicação de um volume de 150 ml/d de água deionizada.

A tabela 5.19 apresenta as cargas totais de alumínio aplicadas e lixiviadas dos vasos com composto orgânico.

Tabela 5.19. Carga total de alumínio (mg) aplicada e lixiviada dos vasos com composto orgânico

Carga de alumínio total (mg)	Vaso 1	Vaso 2	Vaso 3	Vaso 4	Vaso 5
Aplicada	0,0000	1,0098	1,3464	1,6830	2,0196
Lixiviada	0,1204	0,1769	0,2017	0,2167	0,2054
Retida (%)	0,0000	82,48	85,02	84,90	89,83

Pode-se verificar que as cargas de alumínio lixiviadas dos vasos foram extremamente baixas comparadas com as quantidades de alumínio aplicadas, concluindo-se que este fica retido pelo composto orgânico, comprovando sua capacidade adsortiva e quelante das micelas orgânicas. No vaso 1, onde foi aplicada somente água deionizada sobre o composto orgânico por um período de 10 dias, a carga total de alumínio lixiviada também foi extremamente baixa..

### 5.5. Classificação do lodo de ETA

Os resíduos sólidos podem estar na forma sólida ou semi-sólida, sendo classificadas em três classes distintas:

a) Resíduo Classe 1 - Perigoso

b) Resíduo Classe 2 - Não-inerte

c) Resíduo Classe 3 – Inerte

Para a classificação do lodo de ETA utilizado nesta pesquisa, foi necessária a realização dos ensaios de lixiviação e solubilização, os quais constam na norma NBR 10.005 e NBR 10.006.

No teste de lixiviação, foram analisadas as concentrações dos elementos que provavelmente poderiam estar presentes e que fazem parte componente do Anexo G, Listagem nº. 7 da NBR 10.004. São eles: cromo total, chumbo e cádmio. A tabela 5.20 apresenta os resultados obtidos no teste de lixiviação de duas amostras de lodo desidratado de ETA analisadas.

Tabela 5.20. Resultados obtidos no teste de lixiviação de duas amostra de lodo de desidratado de ETA

Poluente	Amostra 1	Amostra 2	Limite máximo no lixiviado (mg/L) (NBR 10.004)
Cádmio	0,014	0,009	0,5
Chumbo	ND	ND	5,0
Cromo total	0,092	0,104	5,0

ND = não detectado

Pode-se verificar através dos resultados obtidos no teste de lixiviação das amostras de lodo desidratado de ETA, que as concentrações dos poluentes analisados estão bem abaixo do limite máximo permitido nos lixiviados nos teste de lixiviação, conforme NBR 10.004. Assim, com base nos resultados obtidos, o lodo desidratado de ETA utilizado no presente estudo, não é classificável como Resíduo Classe 1- Perigoso, cabendo a ele ser analisado com base nos resultados obtidos no teste de solubilização.

No teste de solubilização foram analisadas as concentrações dos seguintes poluentes: alumínio, cobre, ferro, manganês, sódio, zinco. A tabela 5.21 apresenta os resultados obtidos no teste de solubilização de duas amostras de lodo desidratado de ETA analisadas.

Tabela 5.21. Resultados obtidos no teste de solubilização de duas amostra de lodo de desidratado de ETA

Poluente	Amostra 1	Amostra 2	Limite máximo no extrato (mg/L) (NBR 10.004)
Alumínio	1,248	1,021	0,2
Cobre	0,005	0,005	1,0
Ferro	12,0	12,09	0,3
Manganês	2,2	2,2	0,1
Sódio	0,157	0,178	200,0
Zinco	0,009	0,022	5,0

Pode-se verificar, através dos resultados obtidos no teste de solubilização das amostras de lodo desidratado de ETA, que as concentrações dos poluentes alumínio, ferro e manganês estão acima do limite máximo permitido nos extratos dos testes de solubilização, conforme NBR 10.004, não podendo ser classificado como Resíduo Classe 3 - Inerte. Assim, o lodo desidratado de ETA analisado pode ser classificado como Resíduo Classe 2 - Não inerte.

### 5.6. Macro e micronutrientes

Foram determinadas as concentrações de macro e micronutrientes de doze amostras de lodo desidratados de ETA resultantes dos **Experimentos 2** e **Experimentos 3**. Os macronutrientes analisados foram o nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio; os micronutrientes foram o alumínio, ferro, sódio, zinco, cobre, manganês e ferro.

A determinação das concentrações de macro e micronutrientes tanto nos lodos de ETE como nos lodos de ETA, permite que estes sejam classificados como adubo ou condicionantes de solo. A tabela 5.22 apresenta os valores médios obtidos nas análises realizadas nos lodos desidratados de ETEs da cidade de Brasília e os obtidos do lodo desidratado de ETA da cidade de Porto Alegre, utilizado nesta pesquisa.

O estudo realizado por LUDIVICE (1996), concluiu que o lodo de ETE de Brasília não pode ser considerado um adubo, embora rico em fósforo e nitrogênio, pois apresenta baixas concentrações de potássio. Com base nestas observações, o lodo de ETE de Brasília foi classificado como acondicionante de solo.

Tabela 5.22. Macro e micronutrientes de lodos desidratados de ETEs de Brasília e de lodos de ETA de Porto Alegre

Macro e micronutrientes (%)	Lodo de ETEs de Brasília	Lodo de ETA de Porto Alegre
pH*	7,8 - 8,0	6,0 - 6,3
Umidade	80 - 86	75 - 87
Máteria orgânica	45 - 60	30 - 40
Nitrogênio	4,5 - 6,5	0,02 - 1,99
Fósforo	2,0 - 4,0	0,22 - 0,41
Potássio	0,3 - 0,4	0,29 - 0,4
Zinco	0,05 - 0,08	1,36 - 1,6
Cálcio	4,0 - 5,0	0,01 - 0,03
Magnésio	0,2 - 4,0	0,27 - 0,52
Ferro	2,0 - 4,0	5,7 - 6,1
Alumínio	1,0 - 3,0	4,49 - 7,49
Sódio	0,1 - 0,2	1,77 - 2,53
Cobre	0,01 - 0,02	0,66 - 0,75
Manganês	0,01 - 0,02	3,99 - 4,83

- Com exceção do pH, os demais foram expressos em base seca 105 – 110 °C.

Fonte: LUDUVICI (1996)

Conforme METCALF & EDDY (1991), as concentrações de nutrientes que um material deve possuir para ser considerado adubo é de 5% de nitrogênio, 10% de fósforo e 10% de potássio. Assim, o lodo desidratado de ETA analisado pode ser classificado apenas como condicionante de solo, pois os principais nutrientes que um adubo deve possuir, o mesmo possui em concentrações muito baixas.

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1. Experimento 1

#### 6.1.1. Desidratação do lodo velho de ETA em leitos de secagem com meio drenante de areia

##### 6.1.1.1. Lodo

O período necessário para a desidratação do lodo velho foi superior ao lodo novo, provavelmente pelo aumento da resistência específica, como foi observado por GRANDIN *et al.* (1993), que verificou que lodos velhos apresentavam uma resistência específica três vezes maior que os novos, quando desidratados após um período de armazenamento superior a uma semana. Provavelmente, o aumento do tempo de contato entre as componentes do lodo instrumentalizou o aumento da resistência.

No **Experimento 1**, o lodo velho utilizado apresentou-se de uma forma mais gelatinosa e densa, em comparação com o lodo novo, que apresentou sólidos na forma de pequenos flocos, com grande capacidade de sedimentação.

A concentração de sólidos de aproximadamente 20 % na massa de lodo desidratada, foi obtida para os lodos velhos após um período longo de permanência nos leitos, em torno de um mês, enquanto para lodos novos foram necessários apenas 14 dias. A concentração mínima de sólidos em lodo desidratado para sua disposição em aterros sanitários, deve ser superior a 25 % (KAWAMURA,1991). Ressalte-se que neste experimento, a concentração de sólidos resultante o foi apenas durante a drenagem do líquido por gravidade; seguramente, com a permanência do lodo nos leitos por um período maior, e ter-se-ia possivelmente a garantia de concentrações de sólidos em acor aparentado com a bibliografia, em decorrência, por exemplo, de perdas por evaporação.

O tempo médio de permanência dos lodos de estações de tratamento de efluentes domésticos em leito de secagem, embora dependa da temperatura ambiente, é normalmente de um mês. Nas operações de desidratação natural de lodo de ETA realizadas no Japão, o tempo de permanência do lodo nos leitos de secagem é de 4 a 5 meses, com a obtenção de

concentrações de sólidos de 35 a 45 %, embora de uma precipitação pluviométrica sobre os leitos da ordem de 1.450 mm/ano (KAWAMURA *et al.*, 1991). No caso da cidade de Porto Alegre, a precipitação pluviométrica média anual é de 1.200 mm/ano; assim, no caso presente, esta condição climática certamente não estabelece nenhuma restrição para a obtenção da concentração mínima de sólidos na massa de lodo desidratado, para sua posterior disposição em aterros sanitários.

Uma das desvantagens citadas na utilização de leitos de secagem na desidratação de lodos, é o comprometimento da camada superior de areia, tendo em vista que os vazios desta camada são paulatinamente ocupados pelo próprio lodo; assim, durante a operação de remoção do lodo, fatalmente ocorre a retirada conjunta de parte da camada de areia, que necessariamente deve ser repostada, sob pena da perda de eficiência na filtração/drenagem da massa de lodos (COMMITTEE- PARTE 2-1978). Nos leitos de secagem com meios drenantes/filtrantes de diferentes espessuras de areia estudados nesta pesquisa, não foi observado o comprometimento do meio drenante/filtrante pela penetração do lodo. COR APARENTEDEIRO (1993) observou o fenômeno referido apenas no primeiro centímetro mais superficial da camada de areia dos leitos de secagem que acompanhou experimentalmente. Por esta razão, poder-se-ia pensar que uma camada menor de areia resolveria satisfatoriamente as necessidades dos leitos de secagem; no entanto, no **Experimento 3** desta pesquisa, verificou-se que uma camada de areia com espessura de 5 cm foi insuficiente para reter os sólidos do lodo bruto, logo após sua aplicação sobre o meio drenante/filtrante do leito de secagem. A retenção dos sólidos do lodo foi obtida somente após a formação da interface sólido/líquido, de forma que a massa de lodo sedimentada serviu como meio atenuador/retentor dos sólidos.

#### **6.1.1.2. Percolado**

Através da monitoramento dos diferentes parâmetros físico/químicos dos efluentes dos leitos, observou-se que quanto maior a espessura do meio drenante/filtrante, melhor foi a qualidade do líquido drenado, tanto no que se refere a cor aparente como no que tange a turbidez. Isto vale para a carga de matéria orgânica, sensivelmente removida, em função da retenção maior de sólidos pela maior espessura da camada drenante/filtrante, verificando-se remoções de DQO de 96 a 98% para lodos velhos e novos.

A carga de alumínio no filtrado foi extremamente baixa, com praticamente todo o alumínio ficando retido na massa de sólidos de lodo, que é constituída pelas partículas em suspensão na água bruta; durante a coagulação/floculação, estas partículas formam com o alumínio hidrolisado, complexos coloidais inorgânicos e orgânicos, que são removidos facilmente durante o processo convencional de tratamento. Possivelmente, as formas de alumínio predominantes no percolado sejam formadas por alumínio monomolecular, livre, ou de outros compostos inorgânicos ou moléculas orgânicas dissolvidas, semelhantes às formas predominantes na água ao final do processo de tratamento (REITER *et al.*, 1995). Nos percolados dos leitos estudados, foram realizadas apenas análises de alumínio total, não se enfatizando a especiação do elemento.

A retenção da matéria orgânica determinou, concomitantemente, a atenuação do alumínio, que ficou aprisionado na massa de lodo sobre os leitos, em percentuais/concentrações extremamente altos. A retenção de grande parte destas parcelas de alumínio se deveu, provavelmente, às capacidades adsorptivas e quelantes do material orgânico, que retido na parte superior dos leitos, pode ter proporcionado a formação de complexos metálicos insolúveis, precipitados assim superficialmente sobre a areia (BIDONE, 1997).

No que se refere ao pH, o valor relativamente baixo observado ao início do experimento, tendeu a elevar-se durante a experimentação. O pH inicialmente baixo pode ter sido devido ao fato de que o lodo ficou armazenado em bombonas fechadas por vários dias, antes de seu uso, e isto pode ter determinado a degradação parcial da material orgânico que o compunha, com acidificação do meio; já, a partir de sua disposição sobre o leito, as trocas com o ar atmosférico, com a possível oxidação e formação complementar de bases, e a pouca solubilidade do hidróxido de alumínio, com a retenção do metal, explicam a elevação do potencial hidrogeniônico.

Ocorreu a flotação do lodo velho em desidratação, com uma decorrente maior percolação de líquido e uma significativa maior concentração de todos os parâmetros estudados, indistintamente, nos líquidos percolados de cada leito. O acomodamento subsequente do lodo flotante, tão logo drenou a coluna de líquido que separava a parcela de lodo depositada sobre o leito, não permitiu que se aprofundasse o estudo do problema. É possível que a perda parcial de umidade do lodo superficial, associada a uma provável geração e fuga de gases do interior da massa apostada sobre o leito, tenha originado o fenômeno.

## **6.1.2. Desidratação do lodo novo de ETA em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia**

### **6.1.2.1. Lodo**

Os resultados obtidos nos diversos parâmetros físico/químicos analisados, apresentaram-se muito semelhantes aos observados em estudos já realizados com leitos de secagem em escala piloto; no entanto, no que se refere ao tempo necessário para a drenagem total do líquido da massa de lodo, este foi maior, e levou a uma concentração média ao redor de 20% de sólidos totais. As diferenças nos tempos de desidratação certamente ocorreram devida às características do lodo, que variam entre Estações de Tratamento, por razões diversas. Verificou-se que o tempo decorrido entre a formação do lodo e sua disposição nos leitos de secagem, é um fator muito importante a ser considerado para a obtenção de uma maior eficiência na desidratação.

A desidratação do lodo novo foi obtida em um período correspondente à metade daquele necessário para a desidratação do lodo velho, que foi armazenado por um período superior a um mês; esta facilidade de desidratação ocorreu possivelmente devido ao estado muito flocculento da massa de lodo, com alta capacidade de sedimentação, como foi verificado no ensaio realizado com cone Imhoff.

O lodo bruto aplicado sobre os leitos de secagem, teve as concentrações de alumínio variando entre 1.500 mg/L  $Al^{+3}$  a 1.890 mg/L  $Al^{+3}$ . Não houve alterações significativas nas cargas de alumínio nos percolados dos diferentes leitos de secagem estudados. Comprovou-se que a quantidade de alumínio contido nos efluentes dos leitos de secagem, é independente da quantidade existente no lodo bruto, ressaltando-se porém que no caso de lodos velhos, as cargas de alumínio nos percolados dos leitos foram relativamente maiores. Provavelmente, isto deveu-se à perda da capacidade atenuadora do lodo, em decorrência do avanço do processo de estabilização da fração orgânica, que gradativa e continuamente vai humificando.

### 6.1.3. Solubilização/lixiviação do metal alumínio em lodos de ETAs dispostos em leitos de secagem com meio drenante de diferentes espessuras e submetidos à sistemática de rega por solução ácida

Em análises feitas para avaliar o grau de solubilização do alumínio em lodo de ETAs submetido a diferentes pHs, verificou-se que a maior parte do alumínio da amostra de lodo foi obtida em níveis de pH ou muito ácidos ou muito alcalinos, tendo observado a natureza anfótera do hidróxido de alumínio, ocorrendo o mesmo fenômeno para a concentração de carbono orgânico dissolvido (SENGUPTA & BO SHI, 1991).

Com a rega das soluções ácidas sobre o lodo desidratado, supunha-se possível uma maior solubilização do alumínio em níveis de pH mais baixo, obtido pela aplicação de solução ácida com pH = 2,5; no entanto, não ocorreu acréscimo na carga de alumínio no lixiviado do lodo, em virtude da pequena concentração no percolado. Observou-se uma diminuição gradativa desta carga, demonstrando a retenção do alumínio por compostos orgânicos e inorgânicos constituintes do lodo. Ressalte-se que a ação da solução ácida parece ter sido mais efetiva superficialmente, não alcançando desta forma o alumínio presente em toda a massa de lodo.

GEORGE *et al.* (1995), realizaram estudo com a extração de lixiviados de lodo de ETA através de soluções a diferentes pH, com o propósito de avaliar as diferentes espécies de alumínio que seriam solubilizados, mostrou que as maiores concentrações foram obtidas em pH nas faixas mais alcalinas ou mais ácidas; no entanto, essas concentrações foram extremamente baixas, variando entre 0,2 a 0,67 mg/L  $Al^{+3}$  para pH 5,0 , e 0,41 a 1,59 mg/L  $Al^{+3}$  para pH 8,0.

Concentrações muito baixas de alumínio foram também verificadas no **Experimento 3** deste estudo, a partir da aplicação de diferentes soluções ácidas sobre os lodos desidratados; ressaltou-se que na fase de desidratação desses mesmos lodos, as cargas de alumínio quantificadas foram significativamente maiores que as observadas durante a aplicação das soluções ácidas. A pequena solubilização pode ter sido devida as formas de alumínio presentes no lodo. Segundo GONÇALVES *et al.* (1997), só é possível haver a solubilização do alumínio em meios ácidos, se o mesmo estiver na forma hidratada; em caso contrário, a ação da solução ácida não é suficiente para dissolvê-lo.

As cargas de alumínio no lixiviado permitem afirmar que caso o lodo desidratado fosse disposto em aterros sanitários, deste procedimento não resultaria perigo de comprometimento do lençol freático ou qualquer fonte d'água pelo alumínio. A concentração máxima de alumínio permitida pela Lei Estadual é de 10mg/L para efluentes líquidos (Portaria nº 05/89-SSMA). Em um estudo realizado com lodo desidratado mecanicamente, acondicionado com cal, foi verificado que da aplicação de água deionizada à taxas variadas sobre os lodos, não resultaram cargas lixiviadas que sugerissem risco ao ambiente (COMMITTED, PARTE-2, 1978)

## **6.2. Experimento 2**

### **6.2.1. Desidratação do lodo novo de ETA em leitos de secagem com meio drenante/filtrante de mantas geotêxteis**

Neste experimento, verificou-se uma excelente desidratação do lodo com o uso exclusivo de mantas; porém, os percolados dos leitos mostraram elevadas cor aparente e turbidez, quando os resultados foram comparados, por exemplo, aos observados no **Experimento 1**, quando utilizou-se lodos novos.

Quanto a carga de alumínio no percolado, observou-se fenômeno idêntico ao ocorrido nos outros experimentos desenvolvidos, confirmando a pouca influência do meio drenante/filtrante dos leitos sobre a carga total de alumínio lixiviada. O pouco alumínio contido no percolado, decorre aparentere, conforme os resultados até então observados, da retenção do elemento pela massa de lodo.

No que se refere a umidade final do lodo, o sistema de drenagem é de extrema importância, tendo em vista que influencia na qualidade do efluente, e na velocidade de sua geração. Neste experimento, com o uso exclusivo de mantas geotêxteis, com base nos resultados físico/químicos obtidos, verifica-se que parâmetros como o alumínio, cor aparente, turbidez e DQO (havendo a necessidade de relacionar a DQO à vazão), estariam em acordo com a Lei Estadual de disposição final de efluentes líquidos em cursos de água.

### **6.3 Experimento 3**

#### **6.3.1. Desidratação do lodo de ETA em leitos de secagem com meio drenante/filtrante composto por areia e mantas geotêxteis**

Neste experimento verificou-se também uma excelente desidratação do lodo nos leitos de secagem com camada drenante/filtrante composta por areia e mantas geotêxteis. Os percolados dos leitos, apresentaram uma melhor qualidade, com concentrações de cor e turbidez menores, quando os resultados foram comparados, por exemplo, dos observados no **Experimento 1**, quando utilizou-se lodos novos.

Quanto a carga dealumínio no percolado, observou-se fenômeno também idêntico ao ocorrido nos outros experimentos desenvolvidos, confirmando a pouca influência do meio drenante/filtrante dos leitos, sobre a carga total de alumínio lixiviada.

O uso de mantas geotêxteis sobre os leitos de secagem com meio drenante/filtrante de areia aumentou a capacidade de drenagem, com a obtenção de uma umidade final do lodo desidratado em patamares semelhantes aos obtidos nos outros experimentos, após um período de permanência do lodo nos leitos de apenas 72 horas.

### **6.4. Experimento 4**

#### **6.4.1. Polimento final do percolado dos leitos de secagem em substrato caracteristicamente orgânico**

As análises realizadas inicialmente no composto orgânico revelaram uma concentração de alumínio em torno de 2%, metade da concentração verificada no lodo desidratado de ETA utilizado nesta pesquisa. Após a aplicação de um volume de 3,5 L de água deionizada, a carga total de alumínio lixiviada dos vasos com composto orgânico foi extremamente baixa, em média 0,35 mg em um volume de percolado lixiviado de 1,2 L. No **Experimento 1-Fase 2**, que consistia na aplicação de soluções ácidas sobre o lodo desidratado de ETA, também verificou-se uma baixa carga de alumínio lixiviada. Provavelmente as mesmas formas de ligações do alumínio com os compostos orgânicos do lodo de ETA, estão presentes no composto orgânico.

Durante a aplicação de diferentes taxas de percolado sobre o composto orgânico, verificou-se que as cargas de alumínio lixiviadas continuavam em níveis muito baixos, tanto no vaso 5 no qual foi aplicada uma taxa de 300 ml/dia de percolado quanto no vaso 1 onde foi aplicada uma taxa de 150 ml/dia de água deionizada. Assim, verificou-se que o composto orgânico adsorveu e quelou uma parte da carga de alumínio aplicada, que comprovou-se através da análise estatística. É importante salientar que as cargas de alumínio aplicada, também foram muito baixas (tabela A102).

O pH 4 do percolado dos leitos de secagem aplicado sobre o composto orgânico esteve abaixo do padrão de emissão de efluentes líquidos nos cursos de água, conforme Lei Estadual. Após a passagem do percolado pelo composto orgânico, o pH elevou-se para patamares acima de 7, se tornando um efluente adequado para a emissão nos cursos de água, com relação ao parâmetro pH. Esta mudança no pH possivelmente pelo carregamento dos composto alcalinos do composto orgânico, e ocor aparenterendo um aumento gradativo do pH no decor aparenter do experimento.

As cargas de DQO lixiviadas dos vasos durante a aplicação da água deionizada mantiveram-se semelhantes; no entanto, com o aumento significativo dos valores, com a aplicação de diferentes cargas de percolados. Resultou assim acréscimo das cargas de DQO com o aumento das taxas aplicadas de percolado, certamente pelo aumento do volume de líquido lixiviado e ao aumento dos compostos orgânicos carregados. No entanto, as cargas de alumínio não sofreram alterações.

Houve uma redução expressiva da cor aparente e da turbidez do percolado após a passagem pelo composto orgânico, possivelmente pela ação física como filtro deste, retendo parte dos sólidos do percolado que lhe confere cor aparente e turbidez, permanecendo as mesmas concentrações em todos os vasos monitorados independentemente da taxa de percolado aplicada.

Comparando-se o vaso 1 com o vaso 2 nos quais foram aplicados água deionizada e percolado, respectivamente, verificou-se que o comportamento dos parâmetros analisados foram muito semelhantes, no que se refere a volume total percolado, como a cor aparente e a turbidez, carga total de alumínio e DQO. Quando comparando com os outros vasos onde foram aplicada diferentes taxas de percolado, a único parâmetro que não se manteve nos

mesmos patamares foi a carga total de DQO lixiviada, em decorrência do maior volume percolado através do composto orgânico.

### **6.5. Avaliação final dos métodos de desidratação estudados**

A escolha do melhor método de desidratação para o lodo de ETA não é uma tarefa fácil, frente a grande variação das características deste tipo de resíduo e de cada estação de tratamento de água, decorrente principalmente dos constituintes físico-químicos da água bruta. No entanto, com base nos resultados obtidos na análise dos parâmetros físico/químicos do lodo e do percolado estudados, é possível tecer alguns comentários relativamente à eficiência dos procedimentos utilizados ao longo do estudo.

Para observar-se o comportamento de lodos velhos e novos, dispostos sobre leitos de secagem com diferentes espessuras do meio drenante/filtrante de areia, utilizou-se uma lâmina de 30 cm de lodo, volume cor aparenterespondente a 2,4 L, equivalente a uma taxa de aplicação superficial de  $0,31\text{m}^3/\text{m}^2$  de leito de secagem.

Uma das diferenças mais marcantes verificadas entre os dois lodos estudados, foi o tempo de desidratação. Para a desidratação do lodo velho, foi necessário um período de um mês, enquanto que para o lodo novo foram necessários apenas 14 dias, para a obtenção da mesma concentração de sólidos totais na massa de lodo desidratado, em torno de 20 %.

As cargas de alumínio no percolado do lodo velho, foram maiores do que no percolado do lodo novo, embora a concentração de alumínio no lodo bruto velho fosse menor do que no lodo bruto novo -  $1.500\text{ mg/L Al}^{+3}$  no lodo velho e  $1.890\text{ mg/L Al}^{+3}$  no lodo novo. Provavelmente, isto deveu-se ao tempo de permanência do lodo velho nas bombonas transportadoras, com a entrada em degradação de parte do material orgânico presente e com a solubilização do alumínio em ambiente leve e naturalmente acidificado.

A carga de DQO no percolado do lodo velho, foi três vezes maior do que no percolado do lodo novo, o que se comprovou também pelos resultados de concentração menor de cor aparente e turbidez observados no lodo novo.

Os valores de pH permaneceram muito semelhantes tanto no lodo velho como no lodo novo.

Os lodos de ETA novos demonstraram estar melhor condicionados para serem submetidos à operação de desidratação. Provavelmente, isto deveu-se a sua menor resistência específica. Além disso, em termos gerais, houve a melhoria da qualidade do efluente final percolado, tanto do ponto físico quanto químico.

Nos leitos com meio drenante/filtrante constituído por mantas geotêxteis, foi aplicado um volume maior de lodo bruto, aproximadamente 4 L de lodo, para uma camada de 30 cm de espessura de lodo sobre os leitos de secagem simulados. O uso exclusivo de mantas demonstrou não ser muito eficiente quando comparado com os outros métodos estudados, principalmente com relação a qualidade do efluente resultante da desidratação, cujos valores de cor aparente e turbidez foram extremamente altas. No entanto, a umidade final resultante na massa de lodo foi semelhante aos outros métodos de desidratação, porém para período extremamente menor. Em apenas três dias, obteve-se a umidade referida anteriormente, em torno de 80 %.

A carga de alumínio no percolado também permaneceu baixa em todos os métodos de desidratação estudados, de modo que se pode supor que a influência do tipo de meio drenante/filtrante na desidratação não influenciou na concentração de alumínio presente nos efluentes das operações de desidratação.

De forma geral, pode-se afirmar que independentemente do procedimento utilizado, a umidade final da massa de lodo foi praticamente a mesma, em torno de 80 %; portanto, com uma concentração de 20 % de sólidos totais na massa de lodo desidratado.

Essa umidade final, no entanto, não deve ser considerada como o fator preponderante para a escolha do melhor método de desidratação, e sim considerada juntamente com a qualidade do percolado, tendo em vista que o aspecto mais preocupante é a concentração e/ou carga de alumínio passível de ser lixiviada para o ambiente.

Quando se comparam os leitos de secagem constituídos somente por areia com os leitos constituídos por areia mais mantas geotêxteis, observa-se que para a obtenção da mesma

concentração de sólidos já referida, da ordem de 20 %, nos leitos somente com areia foi necessário um período de permanência de 14 dias, enquanto nos leitos com manta geotêxtil foram necessários apenas seis dias.

A carga de alumínio no percolado foi menor nos leitos de secagem com areia e mantas geotêxteis, devido a maior retenção de sólidos pela manta. Parâmetros como cor aparente, turbidez e pH permaneceram em níveis muito próximos, principalmente nas últimas amostras de percolado coletadas, quando as concentrações de cor aparente ficaram em torno de 40 mgPt/L para os leitos com areia e manta, e de 30 mgPt/L para os leitos com areia e sem mantas geotêxteis.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento desta pesquisa, permitem emitir as seguintes conclusões:

1-As cargas de alumínio no percolado dos leitos de secagem com diferentes meios drenantes/filtrantes de areia e/ou mantas geotêxteis foram extremamente baixas, em torno de  $1,5\text{mgAl}^{+3}$ , tanto na desidratação de lodos velhos como novos;

2-A maior parte do alumínio no lodo bruto fica retido na sua massa após a desidratação, permanecendo com concentrações médias de 5% de alumínio na massa de lodo seca;

3-. Quanto maior a espessura do meio drenante/filtrante, maior foi a umidade final do lodo desidratado. A espessura do meio drenante/filtrante influenciou explicitamente na quantidade de líquido drenado, na cor e na turbidez. O tipo de meio drenante/filtrante não influenciou na retenção do alumínio, ficando praticamente retido no lodo desidratado;

4-As baixas concentrações/cargas de alumínio no líquido drenado dos leitos testados, leva a supor que com o seu lançamento em corpos receptores não devem ocorrer prejuízos maiores ao meio ambiente, com os leitos de secagem representando uma interessante alternativa atenuadora do metal;

5-Nos meios drenantes estudados para diferentes leitos de secagem observou-se uma variação significativa na qualidade e quantidade do líquido drenado, verificando-se uma diminuição no tempo de desidratação do lodo com o uso de mantas filtrantes. Isto deve-se ao fato de que sem mantas os sólidos do lodo preenchem os vazios da areia do leito de sustentação e na superfície da mesma; diminuindo a área útil de escoamento. O uso das mantas impediu que o lodo penetra-se na camada superficial da areia;

6-O uso de mantas filtrantes não influenciou na carga de alumínio no líquido drenado dos leitos de secagem. Observou-se que os valores de cargas totais de alumínio no percolado foram muito semelhantes em todos os tipos de meios drenantes estudados, comprovando que o alumínio fica fortemente ligado com compostos presentes no lodo bruto;

7-Com a disposição a uma taxa de  $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^2$  de lodo bruto nos leitos de secagem, foram obtidas concentrações de sólidos totais nos lodos desidratados em torno de 20%, em todos os métodos de desidratação estudados, num período de desidratação que variou de 5 a 30 dias. O tempo gasto na desidratação foi função do tipo de meio drenante utilizado nos leitos de secagem e da idade do lodo bruto disposto;

8-O lodo velho demonstrou ser mais difícil de desidratação do que o lodo novo, além de produzir efluente com maior carga de alumínio e DQO; e maiores concentrações de cor aparente e turbidez, talvez devido a solubilização da matéria orgânica;

9- Nos seis leitos de secagem com meio drenante de diferentes espessuras de areia que foram utilizados no experimento de desidratação e, em seqüência, com aplicação de soluções ácidas sobre os lodos desidratados, verificou-se que as cargas de alumínio no percolado dos leitos foram baixas, apresentando-se mais elevadas durante o período de desidratação;

10-Nas condições em que foram realizados os testes de solubilização do alumínio no lodo desidratado naturalmente, as soluções ácidas em nada favoreceram a solubilização/lixiviação do alumínio, e as cargas em nenhum momento excederam  $0,05 \text{ mg Al}$ , não se diferenciam entre si, e mostrando que as espessuras de leitos e o pH das soluções aplicadas não tiveram interferência significativa nos resultados;

11-As cargas de alumínio no lixiviado do composto orgânico após a aplicação de diferentes taxas de efluentes dos leitos de secagem e durante a aplicação da água deionizada, foram baixas e não diferenciaram entre si, podendo-se supor que há uma capacidade adsortiva significativa do alumínio pelo composto orgânico;

12- Verificou-se assim que o composto orgânico pode ser uma alternativa a ser estuda para atuar como meio atenuador da carga de alumínio nos efluentes da operação de desidratação natural. O composto orgânico também revelou-se um eficiente sistema de neutralização da acidez do efluente, que apresentava pH abaixo dos patamares permitidos pela Lei Estadual do meio ambiente para o descarte de efluentes líquidos em cursos de água;

13-Os ensaios de lixiviação e solubilização do lodo desidratado de ETA da ETA São João/Navegantes, conforme NBR 10004, pode se classificado como resíduo não perigoso, enquadrando-o nos Resíduo Classe 2 - Não inerte, com base nos diferentes parâmetros analisados;

14-O lodo bruto da ETA São João/Navegantes ultrapassou a Lei Estadual do Rio Grande do SUL de emissão de efluentes líquidos direta ou indiretamente em cursos d'água (Portaria nº05/89) quanto aos parâmetros: sólidos sedimentáveis, alumínio, ferro, zinco, cobre e nitrogênio. As concentrações de DQO permitidas por esta lei variam em função da vazão de emissão do efluente cujos valores ficam em 200 mg/L para vazões mínimas e 40 mg/L para vazões máximas, logo em ambos os casos a emissão desse lodo também ultrapassou os níveis permitidos para DQO;

15-O efluente dos leitos de secagem em certos momentos da operação de desidratação, dependendo do tipo de meio drenante utilizados nos leitos, não atendeu a Lei Estadual de emissão de efluentes no parâmetro referente a pH, pois apresentavam valores abaixo do permitido , cujos valores devem ficar entre o pH 6 e 8,5;

16- Nas análises de macro e micronutrientes do lodo de ETA desidratado verificou-se que o mesmo pode ser considerado apenas como um condicionante de solos, pois as concentrações de N, P e K são muito baixas;

## 8.RECOMENDAÇÕES

As conclusões finais do estudo sugerem as seguintes recomendações:

1-Estudo mais aprofundado das características físico-químicas e reológicas do lodo, identificando os compostos químicos presentes na sua composição, principalmente as formas como o alumínio se apresenta. A melhor compreensão do comportamento do lodo produzido nas ETAs permitirá a determinação da melhor alternativa de tratamento e disposição final desse tipo de resíduo;

2-Avaliar o comportamento da desidratação do lodo de ETAs em leitos de secagem em escala piloto sobre interferência das condições climáticas, permitindo a determinação de parâmetros de dimensionamento;

3-Determinação da espessura mínima do meio drenante de areia dos leitos de secagem, encontrando o ponto de equilíbrio entre a qualidade do efluente dos leitos e a concentração mínima de sólidos no lodo desidratado para sua disposição final;

4-Determinação da espessura máxima de lodo bruto a ser disposto nos leitos de secagem sem o comprometimento na operação de desidratação;

5-Determinação da eficiência dos leitos de secagem com o uso de um sistema auxiliar de drenagem superficial do sobrenadante, em vista da alta capacidade de sedimentação dos sólidos do lodo, possibilitando uma diminuição significativa do tempo de permanência do lodo nos leitos e conseqüentemente na diminuição da área de leitos a ser construída;

## 7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, A.E. 1972. Disposal of alum sludges. Journal American Water Works Association, v.64, n.1, p.46-52, jan.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987. Resíduos Sólidos: classificação - NBR 10004. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987. Lixiviação de Resíduos - NBR 10005. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987. Solubilização de Resíduos - NBR 10006. Rio de Janeiro: ABNT.
- AWWA Sludge Disposal Committee. 1978. Water treatment plant sludges - An update of the state of the art: part 1. Journal American Water Works Association, v.70, n.9, p.498-502, sep.
- AWWA Sludge Disposal Committee. 1978. Water treatment plant sludges - An update of the state of the art: part 2. Journal American Water Works Association, v.70, n.10, p.548-554, oct.
- BARBOSA, A B.D. 1997. A experiência da CAESB em recuperação de água de lavagem de filtros e desidratação de lodo de ETA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997. Anais Foz do Iguaçu, PR: ABES. p.1500-1507.
- BIDONE, F.R.A. 1995. A vermicompostagem dos resíduos de curtume, brutos e previamente lixiviados, utilizando composto orgânico urbano como substrato. São Carlos: USP. Tese (Doutorado): Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento, São Carlos, SP. p.184.
- BISHOP, S.L 1978. Alternate processes for treatment of water plant wastes. Journal American Water Works Association, v.70, n.9, p.503-506, sep.

- BISHOP, M. M.; CORNWELL, D.A.; ROLAN, A.T.; BAIRLEY, T.L. 1991. Mechanical dewatering of alum solids and acidified solids: an evaluation. Journal American Water Works Association, v.83, n.9, p. 50-55, sep.
- CASTRO, A. A.; VITORINO DIAS, A M.; RENNÓ, C.R.R.; CÉSAR, T.A.S; DEMATTOS, M; MONTEIRO, T.A.S. 1997. O problema da caracterização qualitativa e quantitativa dos efluentes gerados nas estações de tratamento de águas: o caso da unidade de tratamento e recuperação de resíduos – UTR do sistema Rio das Velhas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997. Anais... Foz do Iguaçu. PR: ABES. p.1412-1429.
- CASTRO, A. A., VITORINO DIAS, A M., RENNÓ, C.R.R., CÉSAR, T.A.S. 1997. Soluções para o tratamento de resíduos de estação de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997. Anais, Foz do Iguaçu, PR: ABES. p.1399-1411.
- CORDEIRO, J.S. 1981. Disposição, tratabilidade e reúso de lodos de estações de tratamento de água. 1981. São Carlos:USP – Curso de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Paulo, p.153.
- CORDEIRO, J.S. 1993. O Problema dos lodos gerados nos decantadores em Estações de tratamento de Água. São Carlos:USP - Curso de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Paulo, p.318.
- CULP, R.L.; WESNER; G.M.; CULP, G.L. 1978. HANDBOOK OF ADVANCED WASTEWATER TREATMENT. 2º ed. New York: Van Nostrand Reinhold. p.623.
- DIAMADOPOULOS, E.; BENEDEK, A. 1984. Aluminum hydrolysis effects on phosphorus removal from wasterwaters. Journal American Water Works Association, v.64, n.11, p.1165-1172, nov.

- ELLIOT, T.H.A., DEMPSEY, B.A. 1991. Agronomic effects of land application of water treatment sludges. Journal American Water Works Association, v.83, n.4, p 126-131, april.
- FERREIRA FILHO, S.S. 1997. Pré-condicionamento de lodo de estação de tratamento de água visando o seu adensamento por gravidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997. Anais... Foz do Iguaçu. PR: ABES. p.1180-1191.
- FULTON, G. P. 1974. Recover alum to reduce waste-disposal costs. Journal American Water Works Association, v.66, n.5, p.312-319, may.
- GEERTSEMA, W.S.; KNOCKE, W.R.; NOVAK, J.T.; DOVE, D. 1994. Long-Term effects of sludge application to land. Journal American Water Works Association, v.86, n.5, p.64-74, may.
- GEORGE, D.B., BERK, S.G., ADAMS, V.D., TING R.S., ROBERTS, R.O; PARKS, L.H. LOTT, R.C. 1995. Toxicity of alum sludges extracts to a freshwater alga, protozoan, fish and marine bacterium. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, n<sup>o</sup> 29, p.149-158, january.
- GONÇALVES, R.F., PIOTTO, Z.C., RESENDE, M.B. 1997. Influência dos mecanismos de coagulação da água bruta na reciclagem de coagulantes em lodos de estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997. Anais... Foz do Iguaçu. PR: ABES. p.1353-1364.
- GRANDIN, S. R.; SOBRINHO, P.A.; GARCIA JR, A.D. 1983. Desidratação de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17, 1993. Anais: trabalhos técnicos. Natal, RN: ABES. p. 324-343.
- JHONSON, G.; BUCHANAN, G.G.; NEWKIRK, D.D. 1992. Optimizing belt filter press dewatering at the skinner filtration plant. Journal American Water Works Association, v.84, n.11 p. 47-51, nov.

- KAWAMURA, S.; TRUSSELL, R.R. 1991. Main featuras of water treatment plants in Japan. Journal American Water Works Association. v.83, n.6, p.56-62, june.
- KAWAMURA, S. 1991. Integrated design of water treatment facilities. New York, p 658.
- KIEHL, E.J. 1985. Fertilizantes orgâncos. São Paulo, Ceres, p.492.
- LUCAS, J.B.; DILLAHA, T. A ; RENEAU, R.B.; NOVAK, J.T.; KNOCKE, W.R. 1994. Alum sludge land application and its effect on plant growth: addition of phosphorus fertilizer corrested the phosphorus deficiency found in fescue grass at higher sluge aplication rates. Journal American Water Works Association. v.86, n.11, p. 75-83, nov.
- LUDUVICE, M.L. Uso e disposição final de lodos orgânicos: Biosólidos. 1996. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DE ESGOTOS SANITÁRIOS, 1996. Anais do Seminário de esgotos sanitários: Tecnologia e perspectivas para o futuro. Brasília, DF: CAESB, 1996. Volume 1, p.85-96.
- MARTEL, C.J.; DIENER, C.J. 1991. A pilot study of alum sludge dewatering in a freezing bed. Journal American Water Works Association, v.83, n.12, december.
- METCALF & EDDY, INC. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, disposal, and reuse. 3° ed., New York: Mcgraw – Hill. Mcgraw-Hill serie in Water Resources and environmental engineering,, p.1334.
- MILANO, L.B.M.; DE LUCA, S.J.; CASTRO, C.M.B.; ROSAURO, M.M.L. 1989. Ocorrência de chuvas ácidas na região metropolitana de Porto Alegre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15, 1989. Belém, PA. Anais: trabalhos livres. Rio de janeiro: ABES. Vol.2, t.3, p.615-625.
- NICHOLSON, J.; GOLDBACH, J.C. 1991. Belt press dewatering of alum sluge proves effective. Water Engineering e Management. v.138, n.12, p.28-31, december.
- RECUPERAÇÃO DAS ÁGUAS DE LAVAGENS, TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DAS ETAS DA RMSP. 1987. SEREC. REVISTA DAE. v.47,

n.150, p.216-219. dec.

REITER, S. ; KUKULL, W. ; STANDISH, P. 1995. Drinking water aluminium and biavailability: aluminum solubility and chemical changes that take place in the human intestine make ready assimilation of aluminum in drinking water unlikely. Journal American Water Works Association, v.87, n.5, p.86-96, may.

Resolução CONAMA nº20, de 18 de junho de 1986. Publicado no D.O.U de 30/7/86.

Rio Grande do Sul. Secretaria da Saúde e do Meio Ambiente Portaria nº 05/89-SSMA. Porto Alegre: SSMA.

SENGUPTA, A.K.; BO SHI. 1992. Selective Alum Recovery From Clarifier Sludge. Journal American Water Works Association. v. 84, n.1, p. 96-103, january.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTERWATER. 1995. 19 ed. Washington: Americam Public Health Association. Organizador: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. Editor: Eaton, A.O.; Clesceri, L.S.; Greenberg, A.E.

TEDESCO, M.J.; VOLKEISS,S.J.; BOHNEM, H. 1985. Análises de solos, plantas e outros materiais (Boletim Técnico de solos). Análise de solos. 2 ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, p.188

VAN BENSCHOTEN, J.F., EDZWALD, DJ.K.1990. Measuring aluminum during water treatment: methodology and aplication. Journal American Water Works Association. v.82, n.5, p.71-78, may.

WATER QUALITY AND TREATMENT: A HANDBOOK ASSOCIATION. 1991. 3 ed. NEW York: Mcgraw-Hill, p.451

WESTERHOFF, G.P. DALY, M.P. 1974. Water treatment plant wastes diposal-part 2. Journal American Water Works Association, v.66, n.6, p.374-384.



As concentrações dos diversos parâmetros estudados durante o período de desidratação do lodo velho em cada leito de secagem estudado, são as constantes das tabelas A.1 a A.3 em seqüência.

**Tabela A.1. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 1.**

Leito 1 (espessura da camada drenante de 16 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turba(UNT)	pH
19/20.11	1	0,179	2,90	648	400	40	5,2
20/26.11	2	0,484	0,96	832	3000	47	6,2
26/28.11	3	0,089	0,77	728	800	16	5,8
28/02.12	4	0,346	0,80	736	1600	22	6,0
02/04.12	5	0,084	0,30	640	800	16	6,1
04/09.12	6	0,053	0,20	824	VI	VI	VI
09/12.12	7	0,053	0,40	VI	VI	VI	VI
12/19.12	8	0,012	VI(*)	VI	VI	VI	VI

(\*) VI = volume insuficiente para realização da análise.

**Tabela A.2. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 2.**

Leito 2 (espessura da camada drenante de 23 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
19/20.11	1	0,207	2,50	704	300	34	5,5
20/26.11	2	0,177	1,30	536	300	14	7,3
26/28.11	3	0,092	1,40	536	400	11	6,3
28/02.12	4	0,530	1,00	832	2000	11	6,5
02/04.12	5	0,081	0,40	800	VI	VI	VI
04/09.12	6	0,101	0,30	696	600	10	6,1
09/12.12	7	0,034	0,40	VI	VI	VI	VI
12/19.12	8	VI(*)	VI	VI	VI	VI	VI

(\*) VI = volume insuficiente para realização da análise.

**Tabela A.3. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 3.**

Leito 3 (espessura da camada drenante de 30 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
19/20.11	1	0,192	2,50	648	200	26	4,9
20/26.11	2	0,113	1,00	408	200	11	7,0
26/28.11	3	0,058	1,00	448	150	9	6,6
28/02.12	4	0,135	1,00	144	300	8	6,2
02/04.12	5	0,076	0,40	928	600	7	7,7
04/09.12	6	0,148	0,60	928	600	7	6,8
09/12.12	7	0,087	0,30	VI(*)	400	10	6,9
12/19.12	8	0,173	0,27	VI	400	8	6,7

(\*) VI = volume insuficiente para realização da análise.

As cargas de alumínio total e DQO, parâmetros para os quais foi dada maior ênfase durante a realização da pesquisa, são as constantes das tabelas A.4 a A.6 em seqüência.

**Tabela A.4. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 1.**

Leito 1 (espessura da camada drenante de 16 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
19/20.11	1	0,179	0,5191	115,99
25/26.11	2	0,484	0,4646	402,69
26/28.11	3	0,089	0,0685	64,79
28/02.12	4	0,346	0,2768	254,65
02/04.12	5	0,084	0,0252	53,76
04/09.12	6	0,053	0,0106	43,67
09/12.12	7	0,053	0,0048	-
12/19.12	8	0,012	-	-
		$\Sigma = 1,300$	$\Sigma = 1,3696$	$\Sigma = 935,55$

**Tabela A.5. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 2.**

Leito 2 (espessura da camada drenante de 23 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
19/20.11	1	0,207	0,5175	145,73
25/26.11	2	0,177	0,2301	94,87
26/28.11	3	0,092	0,1288	49,31
28/02.12	4	0,530	0,5300	440,96
02/04.12	5	0,081	0,0324	64,80
04/09.12	6	0,101	0,0303	70,29
09/12.12	7	0,034	0,0136	-
12/19.12	8	-	-	-
		$\Sigma = 1,222$	$\Sigma = 1,4827$	$\Sigma = 865,96$

**Tabela A.6. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 3.**

Leito 3 (espessura da camada drenante de 30 cm)				
Per. Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
19/20.11	1	0,192	0,4800	124,42
25/26.11	2	0,113	0,1130	46,10
26/28.11	3	0,058	0,0580	25,98
28/02.12	4	0,135	0,1350	19,44
02/04.12	5	0,076	0,0304	70,53
04/09.12	6	0,148	0,0888	137,34
09/12.12	7	0,087	0,0261	-
12/19.12	8	0,173	0,0467	-
		$\Sigma = 0,982$	$\Sigma = 0,978$	$\Sigma = 423,81$

As concentrações dos diversos parâmetros estudados durante o período de desidratação do lodo novo em cada leito de secagem estudado, são as constantes das tabelas A.7 a A.12 em seqüência.

**Tabela A.7. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 1.**

Leito 1 (espessura da camada drenante de 16 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
18.03	1	0,159	0,15	81	30	2,6	6,3
19.03	2	0,168	0,28	50	40	1,1	6,1
20.03	3	0,287	0,60	79	60	1,6	6,6
21.03	4	0,492	0,26	71	150	13	6,3
22.03	5	0,400	0,26	19	150	14	6,9
24.03	7	0,216	0,44	79	60	4,3	6,1
01.04	15	0,097	0,80	151	150	4,9	4,9

**Tabela A.8. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 2.**

Leito 2 (espessura da camada drenante de 23 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
18.03	1	0,237	0,15	120	60	5,0	6,3
19.03	2	0,194	0,28	62	60	1,1	5,8
20.03	3	0,216	0,63	69	40	1,3	6,4
21.03	4	0,064	0,34	80	60	0,8	5,6
22.03	5	0,053	0,19	77	40	1,1	6,4
24.03	7	0,900	0,42	108	150	16	5,8
01.04	15	0,161	0,40	228	150	8,0	5,9

**Tabela A.9. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 3**

Leito 3 (espessura da camada drenante de 30 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
18.03	1	0,154	0,15	75	60	2,3	5,9
19.03	2	0,176	0,24	54	30	0,8	5,8
20.03	3	0,203	0,70	123	30	1,1	5,9
21.03	4	0,076	0,35	36	30	0,8	6,4
22.03	5	0,148	0,18	44	60	3,5	6,5
24.03	7	0,809	0,23	58	150	18	5,7
01.04	15	0,167	0,16	81	60	3,3	6,0

**Tabela A.10. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 4**

Leito 4 (espessura da camada drenante de 16 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>+3</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
18.03	1	0,199	0,10	78	60	2,9	6,2
19.03	2	0,181	0,38	65	40	0,9	6,4
20.03	3	0,217	0,22	55	30	1,1	6,4
21.03	4	0,156	0,44	63	80	4,1	6,4
22.03	5	0,087	0,23	64	100	6,4	6,1
24.03	7	0,842	0,52	90	150	18	5,7
01.04	15	0,120	1,02	323	400	4,4	4,4

**Tabela A.11. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 5**

Leito 5 (espessura da camada drenante de 23 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>+3</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
18.03	1	0,261	0,42	75	60	5,6	6,0
19.03	2	0,260	0,43	53	40	1,1	6,3
20.03	3	0,217	0,24	44	30	0,8	6,7
21.03	4	0,080	0,11	48	30	0,7	6,9
22.03	5	0,198	0,20	49	150	6,4	6,8
24.03	7	0,709	0,39	67	80	7,0	6,7
01.04	15	0,173	0,21	167	150	3,2	6,5

**Tabela A.12. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 6**

Leito 6 (espessura da camada drenante de 30 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>+3</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
18.03	1	0,263	0,42	121	60	4,3	5,9
19.03	2	0,219	0,49	54	40	1,2	6,4
20.03	3	0,232	0,30	49	30	1,2	6,6
21.03	4	0,627	0,28	42	150	16	6,1
22.03	5	0,240	0,36	41	150	14	6,3
24.03	7	0,213	0,36	87	60	2,9	6,9
01.04	15	0,109	0,17	159	80	2,8	6,9

As cargas de alumínio total e DQO, parâmetros para os quais foi dada maior ênfase durante a realização da pesquisa, são as constantes das tabelas A.13 a A.18 em seqüência.

**Tabela A.13. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 1.**

Leito 1 (espessura da camada drenante de 16 cm)				
Coleta	Amostra	VOLUME(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
18.03	1	0,159	0,0238	12,87
19.03	2	0,168	0,0473	8,40
20.03	3	0,287	0,1722	22,67
21.03	4	0,492	0,1279	34,96
22.03	5	0,400	0,1040	19,60
24.03	7	0,216	0,0950	17,06
01.04	15	0,097	0,0776	14,64
		$\Sigma = 1,82$	$\Sigma = 0,6478$	$\Sigma = 130,17$

**Tabela A.14. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 2.**

Leito 2 (espessura da camada drenante de 23 cm)				
Coleta	Amostra	VOLUME(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
18.03	1	0,237	0,0355	28,44
19.03	2	0,194	0,0543	12,02
20.03	3	0,216	0,1360	14,90
21.03	4	0,064	0,0217	5,20
22.03	5	0,053	0,0100	4,08
24.03	7	0,900	0,3780	97,20
01.04	15	0,161	0,0644	36,70
		$\Sigma = 1,825$	$\Sigma = 0,6999$	$\Sigma = 198,54$

**Tabela A.15. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 3.**

Leito 3 (espessura da camada drenante de 30 cm)				
Coleta	Amostra	VOLUME(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
18.03	1	0,154	0,0231	11,55
19.03	2	0,176	0,0422	9,56
20.03	3	0,203	0,1421	24,96
21.03	4	0,076	0,2660	2,73
22.03	5	0,148	0,0266	6,51
24.03	7	0,809	0,1860	46,98
01.04	15	0,167	0,0267	13,52
		$\Sigma = 1,73$	$\Sigma = 0,7127$	$\Sigma = 115,75$

**Tabela A.16. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 4.**

Leito 4 (espessura da camada drenante de 16 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
18.03	1	0,199	0,0199	15,52
19.03	2	0,181	0,0688	11,76
20.03	3	0,217	0,0477	11,93
21.03	4	0,156	0,0686	9,82
22.03	5	0,087	0,0200	5,56
24.03	7	0,842	0,4378	75,78
01.04	15	0,120	0,1224	38,76
		$\Sigma = 1,802$	$\Sigma = 0,7852$	$\Sigma = 169,13$

**Tabela A.17. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 5.**

Leito 5(espessura da camada drenante de 23 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
18.03	1	0,261	0,1096	19,57
19.03	2	0,260	0,1118	13,78
20.03	3	0,217	0,0521	9,54
21.03	4	0,080	0,0088	3,84
22.03	5	0,198	0,0396	9,70
24.03	7	0,709	0,2765	47,50
01.04	15	0,173	0,0363	28,89
		$\Sigma = 1,898$	$\Sigma = 0,6347$	$\Sigma = 132,82$

**Tabela A.18. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 6.**

Leito 6(espessura da camada drenante de 30 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
18.03	1	0,263	0,1105	31,82
19.03	2	0,219	0,1073	11,82
20.03	3	0,232	0,0696	11,36
21.03	4	0,627	0,1755	26,33
22.03	5	0,240	0,0864	9,84
24.03	7	0,213	0,0767	18,53
01.04	15	0,109	0,0185	17,33
		$\Sigma = 1,903$	$\Sigma = 0,6445$	$\Sigma = 127,03$

Concentração de diversos parâmetros estudados durante o período de rega sistemática por solução levemente ácida com pH = 6,5, são as constantes da tabela A.19 a A.24 em seqüência

**Tabela A.19. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 1**

Leito 1 (espessura da camada drenante 16 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
02.04	1	0,045	ND(*)	-	150	5,5	5,6
06.04	2	0,054	0,19	34	200	4,4	5,7
10.04	3	0,078	0,10	118	60	3,0	6,0
17.04	4	0,053	0,17	57	40	2,3	6,0

ND= não detectado

**Tabela A.20. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 2**

Leito 2 (espessura da camada drenante 23 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
02.04	1	0,044	ND	-	200	12	5,4
06.04	2	0,057	0,28	-	100	4,9	5,7
10.04	3	0,074	0,21	67	60	3,2	5,7
17.04	4	0,052	0,10	44	40	2,5	6,1

ND= não detectado

**Tabela A.21. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 3**

Leito 3 (espessura da camada drenante 30 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
02.04	1	0,048	ND	-	100	2,2	5,4
06.04	2	0,056	0,31	119	100	2,4	5,8
10.04	3	0,070	0,17	75	40	1,7	6,1
17.04	4	0,047	0,13	-	40	1,3	5,9

ND= não detectado

**Tabela A.22. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 4**

Leito 4 (espessura da camada drenante 16 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
02.04	1	0,052	0,73	-	300	4,6	5,2
06.04	2	0,054	0,21	-	200	2,4	5,4
10.04	3	0,066	0,25	121	80	3,1	5,9
17.04	4	0,056	0,22	66	60	2,4	5,7

**Tabela A.23. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 5**

Leito 5 (espessura da camada drenante 23 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
02.04	1	0,051	0,14	-	120	3,7	6,2
06.04	2	0,047	0,13	35	100	3,2	6,1
10.04	3	0,069	0,20	63	60	2,3	6,0
17.04	4	0,041	0,15	-	60	1,8	6,0

**Tabela A.24. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 6**

Leito 6 (espessura da camada drenante 30 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
02.04	1	0,038	0,10	-	150	3,5	6,5
06.04	2	0,059	0,23	23	150	2,6	6,4
10.04	3	0,071	0,22	69	60	2,6	6,3
17.04	4	0,055	0,13	-	40	1,4	6,2

As cargas de alumínio total e DQO, parâmetros para os quais foi dada maior ênfase durante a realização da pesquisa, são as constantes das tabelas A.25 a A.30 em seqüência.

**Tabela A.25. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 1.**

Leito 1 (espessura da camada drenante 16 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
02.04	1	0,045	0,0000	-
06.04	2	0,054	0,0102	1,83
10.04	3	0,078	0,0078	9,20
17.04	4	0,053	0,0090	3,02
		$\Sigma = 0,230$	$\Sigma = 0,027$	$\Sigma = 14,09$

**Tabela A.26. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 2.**

Leito 2 (espessura da camada drenante 23 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
02.04	1	0,044	0,0000	-
06.04	2	0,057	0,0159	-
10.04	3	0,074	0,0155	4,95
17.04	4	0,052	0,0520	2,28
		$\Sigma = 0,227$	$\Sigma = 0,0366$	$\Sigma = 7,23$

**Tabela A.27. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 3.**

Leito 3 (espessura da camada drenante 30 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
02.04	1	0,048	0,0000	-
06.04	2	0,056	0,0173	6,66
10.04	3	0,070	0,0119	5,25
17.04	4	0,047	0,0061	-
		$\Sigma = 0,221$	$\Sigma = 0,0353$	$\Sigma = 11,91$

**Tabela A.28. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 4.**

Leito 4 (espessura da camada drenante 16 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO (mg)
02.04	1	0,052	0,0379	-
06.04	2	0,054	0,0113	-
10.04	3	0,066	0,0165	7,98
17.04	4	0,056	0,0123	3,69
		$\Sigma = 0,228$	$\Sigma = 0,078$	$\Sigma = 11,67$

**Tabela A.29. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 5.**

Leito 5(espessura da camada drenante 23 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO (mg)
02.04	1	0,051	0,0071	-
06.04	2	0,047	0,0061	1,64
10.04	3	0,069	0,0138	4,34
17.04	4	0,041	0,0061	-
		$\Sigma = 0,208$	$\Sigma = 0,0331$	$\Sigma = 5,98$

**Tabela A.30. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 6.**

Leito 6(espessura da camada drenante 30 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)	DQO(mg)
02.04	1	0,038	0,0038	-
06.04	2	0,059	0,0135	1,35
10.04	3	0,071	0,0156	4,89
17.04	4	0,055	0,0071	-
		$\Sigma = 0,223$	$\Sigma = 0,040$	$\Sigma = 6,24$

Concentração de diversos parâmetros estudados durante o período de rega sistemática por solução ácida com pH = 5,0, são as constantes da tabela A.31 a A.36 em seqüência

**Tabela A.31. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 1**

Leito 1 (espessura da camada drenante 16 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
24.04	1	0,041	0,26	-	40	1,2	6,1
28.04	2	0,054	0,32	-	40	1,8	5,7
30.04	3	0,041	0,51	-	40	2,0	5,7
05.05	4	0,054	0,10	90	30	2,2	6,4
07.05	5	0,035	0,10	-	20	1,1	6,7

**Tabela A.32. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 2**

Leito 2 (espessura da camada drenante 23 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
24.04	1	0,044	0,21	-	60	2,5	6,5
28.04	2	0,062	0,39	-	40	3,6	6,2
30.04	3	0,060	0,51	-	40	2,6	5,9
05.05	4	0,055	0,17	58	30	3,6	5,8
07.05	5	0,034	0,13	-	20	1,7	6,6

**Tabela A.33. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 3**

Leito 3 (espessura da camada drenante 30 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
24.04	1	0,046	0,31	-	40	2,2	5,5
28.04	2	0,085	0,34	-	30	1,5	5,9
30.04	3	0,047	0,47	-	30	1,3	5,8
05.05	4	0,057	0,57	63	20	1,5	5,7
07.05	5	0,025	0,15	-	20	1,4	6,5

**Tabela A.34. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 4**

Leito 4 (espessura da camada drenante 16 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
24.04	1	0,037	0,31	-	40	1,7	5,7
28.04	2	0,067	0,53	-	40	2,8	5,2
30.04	3	0,042	0,10	-	30	1,7	5,4
05.05	4	0,054	0,10	34	30	2,3	5,6
07.05	5	0,030	0,16	-	20	1,5	5,7

**Tabela A.35. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 5**

Leito 5 (espessura da camada drenante 23 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
24.04	1	0,044	0,25	-	40	2,2	6,2
28.04	2	0,063	0,50	-	30	2,3	5,2
30.04	3	0,041	0,18	-	20	1,3	5,2
05.05	4	0,054	0,12	34	10	1,3	5,2
07.05	5	0,034	0,17	-	10	0,8	4,4

**Tabela A.36. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 6**

Leito 6 (espessura da camada drenante 30 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
24.04	1	0,044	0,49	-	40	2,6	6,5
28.04	2	0,075	0,38	-	30	2,4	5,8
30.04	3	0,044	0,22	-	20	3,0	5,7
05.05	4	0,053	0,10	33	20	1,8	5,8
07.05	5	0,033	0,16	-	20	1,4	6,1

As cargas de alumínio total, parâmetro para o qual foi dada maior ênfase durante a realização da pesquisa, são as constantes das tabelas A.37 a A.42 em seqüência.

**Tabela A.37. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 1.**

Leito 1 (espessura da camada drenante 16 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
24.04	1	0,041	0,0106
28.04	2	0,054	0,0172
30.04	3	0,041	0,0209
05.05	4	0,054	0,0054
07.05	5	0,035	0,0350
		$\Sigma = 0,225$	$\Sigma = 0,0576$

**Tabela A.38. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 2.**

Leito 2 (espessura da camada drenante 23 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
24.04	1	0,044	0,0092
28.04	2	0,062	0,0241
30.04	3	0,060	0,0306
05.05	4	0,055	0,0093
07.05	5	0,034	0,0044
		$\Sigma = 0,256$	$\Sigma = 0,0776$

**Tabela A.39. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 3.**

Leito 3 (espessura da camada drenante 30 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
24.04	1	0,046	0,0142
28.04	2	0,085	0,0289
30.04	3	0,047	0,0222
05.05	4	0,057	0,0057
07.05	5	0,025	0,0037
		$\Sigma = 0,260$	$\Sigma = 0,0745$

**Tabela A.40. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 4.**

Leito 4 (espessura da camada drenante 16 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
24.04	1	0,037	0,0114
28.04	2	0,067	0,0355
30.04	3	0,042	0,0042
05.05	4	0,054	0,0054
07.05	5	0,030	0,0048
		$\Sigma = 0,230$	$\Sigma = 0,0613$

**Tabela A.41. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 5.**

Leito 5 (espessura da camada drenante 23 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
24.04	1	0,044	0,011
28.04	2	0,063	0,0315
30.04	3	0,041	0,0073
05.05	4	0,054	0,0064
07.05	5	0,034	0,00057
		$\Sigma = 0,236$	$\Sigma = 0,0619$

**Tabela A.42. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 6.**

Leito 6 (espessura da camada drenante 30 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
24.04	1	0,044	0,0215
28.04	2	0,075	0,0285
30.04	3	0,044	0,0096
05.05	4	0,053	0,0053
07.05	5	0,033	0,0052
		$\Sigma = 0,249$	$\Sigma = 0,0701$

Concentração de diversos parâmetros estudados durante o período de rega sistemática por solução ácida com pH =2,5, são as constantes da tabela A.43 a A.48 em seqüência

**Tabela A.43. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 1**

Leito 1 (espessura da camada drenante 16 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>+3</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
08.05	1	0,056	0,1	-	20	1,3	4,3
12.05	2	0,060	ND	12	20	0,7	6,5
13.05	3	0,049	ND	-	10	0,8	3,3
16.05	4	0,058	0,27	-	20	1,0	5,7
21.05	5	0,065	0,13	11	20	1,4	5,4

**Tabela A.44. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 2**

Leito 2 (espessura da camada drenante 23 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>+3</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
08.05	1	0,064	0,24	-	20	1,0	4,1
12.05	2	0,063	0,15	17	20	0,9	5,8
13.05	3	-	-	-	-	-	-
16.05	4	0,070	0,34	-	20	1,0	5,5
21.05	5	0,069	0,82	35	20	1,4	5,4

**Tabela A.45. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 3**

Leito 3 (espessura da camada drenante 30 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>+3</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
08.05	1	0,062	0,12	-	20	1,2	5,8
12.05	2	0,068	ND	-	10	0,7	6,1
13.05	3	0,039	ND	12	20	1,7	5,4
16.05	4	-	-	-	-	-	-
21.05	5	0,068	0,39	32	10	0,7	4,8

**Tabela A.46. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 4**

Leito 4 (espessura da camada drenante 16 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>+3</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
08.05	1	0,053	ND	-	20	0,9	5,9
12.05	2	0,067	ND	16	10	0,8	5,5
13.05	3	-	-	-	-	-	-
16.05	4	0,062	0,29	-	10	0,9	5,3
21.05	5	0,064	0,37	89	10	0,9	5,2

**Tabela A.47. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 5**

Leito 5 (espessura da camada drenante 23 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>+3</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
08.05	1	0,048	0,12	-	20	0,9	5,8
12.05	2	0,055	0,1	17	20	0,8	5,3
13.05	3	0,039	ND	-	20	0,8	4,7
16.05	4	0,046	0,15	-	20	1,2	5,5
21.05	5	0,054	0,21	83	20	1,2	5,3

**Tabela A.48. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 6**

Leito 6 (espessura da camada drenante 30 cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>+3</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
08.05	1	0,059	0,16	-	20	0,7	6,0
12.05	2	0,062	ND	12	10	1,1	6,0
13.05	3	0,041	ND	-	20	0,8	6,2
16.05	4	0,062	ND	-	20	0,9	5,6
21.05	5	0,069	0,20	75	10	0,7	5,3

As cargas de alumínio total, parâmetro para o qual foi dada maior ênfase durante a realização da pesquisa, são as constantes das tabelas A.49 a A.54 em seqüência.

**Tabela A.49. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 1.**

Leito 1 (espessura da camada drenante 16 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
08.05	1	0,056	0,0056
12.05	2	0,060	0,0000
13.05	3	0,049	0,0000
16.05	4	0,058	0,0156
21.05	5	0,065	0,0084
		$\Sigma = 0,288$	$\Sigma = 0,0296$

**Tabela A.50. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 2.**

Leito 2 (espessura da camada drenante 23 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
08.05	1	0,064	0,0153
12.05	2	0,063	0,0940
13.05	3	-	-
16.05	4	0,070	0,0238
21.05	5	0,069	0,0565
		$\Sigma = 0,266$	$\Sigma = 0,1050$

**Tabela A.51. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 3.**

Leito 3 (espessura da camada drenante 30 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
08.05	1	0,062	0,0074
12.05	2	0,068	0,0000
13.05	3	0,039	0,0000
16.05	4	-	-
21.05	5	0,068	0,0265
		$\Sigma = 0,237$	$\Sigma = 0,0339$

**Tabela A.52. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 4.**

Leito 4 (espessura da camada drenante 16 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
08.05	1	0,053	0,0000
12.05	2	0,067	0,0000
13.05	3	-	-
16.05	4	0,062	0,0179
21.05	5	0,064	0,0236
		$\Sigma = 0,246$	$\Sigma = 0,0415$

**Tabela A.53. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 5.**

Leito 5 (espessura da camada drenante 23 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
08.05	1	0,048	0,0057
12.05	2	0,055	0,0055
13.05	3	0,039	0,0000
16.05	4	0,046	0,0690
21.05	5	0,054	0,0113
		$\Sigma = 0,242$	$\Sigma = 0,0294$

**Tabela A.54. Carga de alumínio total observada no percolado do Leito 6.**

Leito 6 (espessura da camada drenante 30 cm)			
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>+3</sup> (mg)
08.05	1	0,059	0,0094
12.05	2	0,062	0,0000
13.05	3	0,041	0,0000
16.05	4	0,062	0,0000
21.05	5	0,069	0,0138
		$\Sigma = 0,293$	$\Sigma = 0,0232$

As concentrações dos diversos parâmetros estudados durante o período de desidratação do lodo novo em cada leito de secagem com meio drenante de mantas diferentes espessuras estudado, são as constantes das tabelas A.55 a A.60 em seqüência.

**Tabela A.55. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito com manta XT-4**

Leito com manta XT-4							
Coleta	Am	V.(l)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
1 hora	1	0,600	0,748	202	1000	125	5,4
4 horas	2	0,910	0,331	136	400	50	4,1
23 horas	3	0,925	0,165	86	150	15	4,2
72 horas	4	0,243	0,331	44	100	6,5	4,6

**Tabela A.56. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito com manta OP-20**

Leito com manta OP-20							
Coleta	Am	V.(l)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
1 hora	1	0,620	0,665	164	1000	110	4,5
4 horas	2	0,875	0,331	129	400	47	4,2
23 horas	3	0,925	0,165	86	150	15	4,2
72 horas	4	0,287	0,331	60	80	7,0	4,5

**Tabela A.57. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito com manta OP-30**

Leito com manta OP-30							
Coleta	Am	V.(l)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
1 hora	1	0,755	0,498	151	1000	110	4,4
4 horas	2	0,955	0,331	138	400	57	4,2
23 horas	3	0,885	0,165	88	150	17	4,2
72 horas	4	0,180	0,581	54	150	22	4,3

**Tabela A.58. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito com manta OP-40**

Leito com manta OP-40							
Coleta	Am	V.(l)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
1 hora	1	0,885	0,415	124	1000	105	4,5
4 horas	2	1,025	0,165	135	400	52	4,2
23 horas	3	0,850	0,165	102	200	22	4,1
72 horas	4	0,130	0,165	55	60	5,7	4,3

**Tabela A.59. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito com manta OP-60**

Leito com manta OP-60							
Coleta	Am	V.(l)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
1 hora	1	1,860	0,415	95	1000	90	4,5
4 horas	2	0,875	0,165	103	400	42	4,3
23 horas	3	0,385	0,326	107	200	18	4,2
72 horas	4	0,000	-	-	-	-	-

**Tabela A.60. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito sem manta**

Leito Branco(sem manta)							
Coleta	Am	V.(l)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
1 hora	1	0,465	260,34	1594	20000	1700	4,6
4 horas	2	0,375	0,335	139	800	87	4,4
23 horas	3	1,055	0,326	129	800	50	4,1
72 horas	4	0,510	0,415	137	1500	128	4,0
120 horas	5	0,384	0,165	191	1000	300	3,8

As cargas de alumínio total e DQO, parâmetros para os quais foi dada maior ênfase durante a realização da pesquisa, são as constantes das tabelas A.61 a A.66 em seqüência.

**Tabela A.61. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito com manta XT-4**

Leito com manta XT-4				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
1 hora	1	0,600	0,4488	121,20
4 horas	2	0,910	0,3012	123,76
23 horas	3	0,925	0,1526	79,55
72 horas	4	0,243	0,0804	10,69
		$\Sigma = 2,678$	$\Sigma = 0,983$	$\Sigma = 335,20$

**Tabela A.62. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito com manta OP-20**

Leito com manta OP-20				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
1 hora	1	0,620	0,4123	101,68
4 horas	2	0,875	0,2896	112,87
23 horas	3	0,925	0,1526	79,55
72 horas	4	0,287	0,0949	17,22
		$\Sigma = 2,707$	$\Sigma = 0,9494$	$\Sigma = 311,32$

**Tabela A.63. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito com manta OP-30**

Leito com manta OP-30				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
1 hora	1	0,755	0,3759	114,00
4 horas	2	0,955	0,3161	131,79
23 horas	3	0,885	0,1460	77,88
72 horas	4	0,180	0,1045	9,88
		$\Sigma = 2,775$	$\Sigma = 0,925$	$\Sigma = 333,39$

**Tabela A.64. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito com manta OP-40**

Leito com manta OP-40				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
1 hora	1	0,885	0,3672	109,74
4 horas	2	1,025	0,1691	138,37
23 horas	3	0,850	0,1402	86,70
72 horas	4	0,130	0,0214	7,15
		$\Sigma = 2,89$	$\Sigma = 0,6979$	$\Sigma = 341,96$

**Tabela A.65. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito com manta OP-60**

Leito com manta OP-60				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
1 hora	1	1,860	0,7719	176,70
4 horas	2	0,875	0,1443	90,12
23 horas	3	0,385	0,1255	41,19
72 horas	4	0,000	-	-
		$\Sigma = 3,12$	$\Sigma = 1,0417$	$\Sigma = 308,01$

**Tabela A.66. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito sem manta**

Leito Branco (sem manta)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
1 hora	1	0,465	121,05	741,21
4 horas	2	0,375	0,1256	52,12
23 horas	3	1,055	0,3439	136,09
72 horas	4	0,510	0,2116	69,87
120 horas	5	0,384	0,0633	73,34
		$\Sigma = 2,789$	$\Sigma = 121,80$	$\Sigma = 1072,63$

As concentrações dos diversos parâmetros estudados durante o período de desidratação do lodo novo em cada leito de secagem com o meio drenante constituído de areia e mantas filtrantes estudado, são as constantes das tabelas A.67 a A.72 em seqüência.

**Tabela A.67. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 1 com manta XT-4**

Leito 1 com manta XT-4 (espessura do leito 16cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
20 min	1	0,925	0,326	104	300	64	4,3
2h 45min	2	0,895	0,244	94	150	5,5	4,,2
19h 25min	3	0,275	0,162	62	100	4,5	4,4
76h 45min	4	0,040	0,330	37	40	3,0	5,4

**Tabela A.68. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 2 com manta OP-30**

Leito 2 com manta OP-30 (espessura do leito 23cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
20 min	1	0,875	0,244	75	200	52	5,1
2h 45min	2	0,935	0,326	89	100	4,6	4,4
19h 25min	3	0,250	0,162	66	100	4,0	4,5
76h 45min	4	0,030	ND(*)	45	40	2,8	5,1

(\*) ND- não detectado

**Tabela A.69. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 3 com manta OP-60**

Leito 3 com manta OP-60 (espessura do leito 30cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
20 min	1	0,710	0,326	68	150	44	5,3
2h 45min	2	0,920	0,244	77	40	14	4,9
19h 25min	3	0,335	0,162	62	20	1,4	5,9
76h 45min	4	0,050	ND(*)	38	40	1,5	5,3

(\*) ND- não detectado

**Tabela A.70. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 4 com manta OP-60**

Leito 4 com manta OP-60 (espessura do leito 16cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
20 min	1	0,860	0,244	105	300	78	4,5
2h 45min	2	0,840	0,244	127	150	7,7	4,2
19h 25min	3	0,250	0,162	71	100	4,0	4,4
76h 45min	4	0,050	ND(*)	55	40	2,2	4,8

(\*) ND- não detectado

**Tabela A.71. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 5 com manta OP-30**

Leito 5 com manta OP-30 (espessura do leito 23cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
20 min	1	0,790	0,226	104	300	67	4,9
2h 45min	2	0,615	0,244	91	100	5,0	4,3
19h 25min	3	0,390	0,162	72	80	3,5	4,4
76h 45min	4	0,070	ND(*)	43	40	3,2	4,8

(\*) ND- não detectado

**Tabela A.72. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do Leito 6 com manta XT-4**

Leito 6 com manta XT-4 (espessura do leito 30cm)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
20 min	1	0,735	0,326	92	200	56	5,3
2h 45min	2	0,715	0,244	91	80	2,5	4,6
19h 25min	3	0,535	0,162	62	80	2,7	4,7
76h 45min	4	0,090	ND(*)	33	40	1,5	5,3

As cargas de alumínio total e DQO, parâmetros para os quais foi dada maior ênfase durante a realização da pesquisa, são as constantes das tabelas A.73 a A.78 em seqüência.

**Tabela A.73. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 1 com manta XT-4**

Leito 1 com manta XT-4 (espessura do leito de 16 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
20 min	1	0,925	0,3015	96,20
2h 45min	2	0,895	0,2183	84,13
19h 25min	3	0,275	0,0445	17,05
76h 45min	4	0,040	0,0132	1,48
		$\Sigma = 2,135$	$\Sigma = 0,5775$	$\Sigma = 198,86$

**Tabela A.74. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 2 com manta OP-30**

Leito 2 com manta PO-30 (espessura do leito de 23 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
20 min	1	0,875	0,2135	65,62
2h 45min	2	0,935	0,3048	83,21
19h 25min	3	0,250	0,0412	16,50
76h 45min	4	0,030	0,0000	1,35
		$\Sigma = 2,09$	$\Sigma = 0,5595$	$\Sigma = 166,65$

**Tabela A.75. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 3 com manta OP-60**

Leito 3 com manta PO-30 (espessura do leito de 30 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
20 min	1	0,710	0,2314	48,28
2h 45min	2	0,920	0,2244	70,84
19h 25min	3	0,335	0,0542	20,77
76h 45min	4	0,050	0,0000	1,90
		$\Sigma = 2,015$	$\Sigma = 0,51$	$\Sigma = 141,79$

**Tabela A.76. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 4 com manta OP-60**

Leito 4 com manta PO-60 (espessura do leito de 16 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
20 min	1	0,860	0,2098	90,30
2h 45min	2	0,840	0,2049	106,68
19h 25min	3	0,250	0,0405	17,75
76h 45min	4	0,050	0,0000	2,75
		$\Sigma = 2,00$	$\Sigma = 0,4552$	$\Sigma = 217,48$

**Tabela A.77. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 5 com manta OP-30**

Leito 5 com manta PO-30 (espessura do leito de 23 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
20 min	1	0,790	0,1785	82,16
2h 45min	2	0,615	0,1500	55,96
19h 25min	3	0,390	0,0631	28,08
76h 45min	4	0,070	0,0000	3,01
		$\Sigma = 1,865$	$\Sigma = 0,3916$	$\Sigma = 169,21$

**Tabela A.78. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Leito 6 com manta XT-4**

Leito 6 com manta XT-4 (espessura do leito de 30 cm)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
20 min	1	0,735	0,2396	67,62
2h 45min	2	0,715	0,1744	65,06
19h 25min	3	0,535	0,0866	33,17
76h 45min	4	0,090	0,0000	3,04
		$\Sigma = 2,075$	$\Sigma = 0,5006$	$\Sigma = 168,89$

As concentrações dos parâmetros estudados durante o período de rega de um volume de 150 ml de água deionizada sobre o composto orgânico, são as constantes das tabelas A.79 a A.83

**Tabela A.79. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso1.**

Vaso 1							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
6.08	1	0,076	0,498	138	160	1,7	7,3
8.08	2	0,115	0,415	125	100	2,0	7,5
11.08	3	0,228	-	137	100	4,0	7,7
12.08	4	0,090	0,248	189	100	2,0	7,7
13.08	5	0,120	0,165	186	100	3,4	7,9
14.08	6	0,120	0,248	184	100	2,1	7,8
18.08	7	0,110	0,248	188	100	2,6	7,3
27.08	8	0,150	0,495	217	200	17	7,9
15.09	9	0,100	0,330	225	200	1,8	8,2

**Tabela A.80. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso2.**

Vaso 2							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
6.08	1	0,277	0,331	138,	150-	1,7	7,4
8.08	2	0,020	0,660	199	-	-	7,5
11.08	3	0,275	0,248	130	150	3,2	7,5
12.08	4	0,075	0,331	223	100	4,7	7,7
13.08	5	0,105	0,331	222	100	3,7	8,0
14.08	6	0,105	0,165	249	150	4,4	8,0
18.08	7	0,105	0,665	272	150	23	7,4
27.08	8	0,125	0,331	294	200	17	7,7
15.09	9	0,095	0,331	272	200	5,8	8,0

**Tabela A.81. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso3.**

Vaso 3							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
6.08	1	0,143	0,331	133	150	10	7,4
8.08	2	0,042	0,330	153	100	2,2	7,8
11.08	3	0,230	0,248	152	150	2,7	7,5
12.08	4	0,091	0,248	221	100	3,0	7,6
13.08	5	0,152	0,165	232	100	2,0	7,8
14.08	6	0,120	0,165	215	150	2,3	7,9
18.08	7	0,110	0,331	219	150	3,0	7,4
27.08	8	0,155	0,415	260	200	20	7,8
15.09	9	0,110	0,331	262	200	3,7	8,0

**Tabela A.82. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso4.**

Vaso 4							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
6.08	1	0,259	0,331	99	160	19	6,9
8.08	2	0,135	0,165	114	100	3,7	8,0
11.08	3	0,325	0,248	101	150	3,1	7,5
12.08	4	0,099	0,331	165	150	23	7,8
13.08	5	0,120	0,331	162	100	7,0	8,0
14.08	6	0,120	0,248	163	150	8,5	7,8
18.08	7	0,110	0,581	159	150	17	6,9
27.08	8	0,120	0,331	240	200	18	7,8
15.09	9	0,085	0,248	225	200	6,2	8,1

**Tabela A.83. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso5.**

Vaso 5							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
6.08	1	0,277	0,498	74	100	19	7,3
8.08	2	0,110	0,248	98	100	3,0	7,4
11.08	3	0,365	0,165	98	100	3,5	7,7
12.08	4	0,101	0,165	140	100	3,5	7,8
13.08	5	0,120	0,331	141	100	4,4	7,9
14.08	6	0,105	0,248	143	100	2,0	7,8
18.08	7	0,105	0,165	137	100	19	7,3
27.08	8	0,095	0,415	207	200	25	7,8
15.09	9	0,065	0,165	192	200	4,5	8,1

As cargas de alumínio total e DQO, parâmetros para os quais foi dada maior ênfase durante a realização da pesquisa, são as constantes das tabelas A.84 a A.88 em seqüência.

**Tabela A.84. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 1.**

Vaso 1				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
6.08	1	0,076	0,0378	10,48
8.08	2	0,115	0,0477	14,37
11.08	3	0,228	-	31,23
12.08	4	0,090	0,0222	17,01
13.08	5	0,120	0,0198	22,32
14.08	6	0,120	0,0297	22,08
18.08	7	0,110	0,0272	20,68
27.08	8	0,150	0,0742	32,55
15.09	9	0,100	0,0330	22,50
		$\Sigma = 1,109$	$\Sigma = 0,2916$	$\Sigma = 193,22$

**Tabela A.85. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 2.**

Vaso 2				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
6.08	1	0,277	0,0751	38,22
8.08	2	0,020	0,0132	3,98
11.08	3	0,275	0,0682	35,75
12.08	4	0,075	0,0248	16,72
13.08	5	0,105	0,0347	23,31
14.08	6	0,105	0,0173	26,14
18.08	7	0,105	0,0698	28,56
27.08	8	0,125	0,0413	36,75
15.09	9	0,095	0,0314	25,64
		$\Sigma = 1,182$	$\Sigma = 0,3758$	$\Sigma = 235,27$

**Tabela A.86. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 3.**

Vaso 3				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
6.08	1	0,143	0,0473	19,01
8.08	2	0,042	0,0138	6,42
11.08	3	0,230	0,0570	34,96
12.08	4	0,091	0,0225	20,11
13.08	5	0,152	0,0206	35,26
14.08	6	0,120	0,0198	25,80
18.08	7	0,110	0,0364	24,69
27.08	8	0,155	0,0643	40,30
15.09	9	0,110	0,0364	28,82
		$\Sigma = 1,126$	$\Sigma = 0,31818$	$\Sigma = 235,37$

**Tabela A.87. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 4.**

Vaso 4				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
6.08	1	0,259	0,0857	25,64
8.08	2	0,135	0,0222	15,39
11.08	3	0,325	0,0806	32,82
12.08	4	0,099	0,0327	16,33
13.08	5	0,120	0,0397	19,44
14.08	6	0,120	0,0297	19,56
18.08	7	0,110	0,0639	17,49
27.08	8	0,120	0,0397	28,80
15.09	9	0,085	0,0017	19,12
		$\Sigma = 1,373$	$\Sigma = 0,4112$	$\Sigma = 194,59$

**Tabela A.88. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 5.**

Vaso 5				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
6.08	1	0,277	0,1379	20,49
8.08	2	0,110	0,0272	10,78
11.08	3	0,365	0,0602	35,77
12.08	4	0,101	0,0166	14,14
13.08	5	0,120	0,0397	16,92
14.08	6	0,105	0,0260	15,01
18.08	7	0,105	0,0173	14,38
27.08	8	0,095	0,0394	19,66
15.09	9	0,065	0,0107	12,48
		$\Sigma = 1,343$	$\Sigma = 0,3750$	$\Sigma = 159,89$

As concentrações dos parâmetros estudados durante o período de rega de um volume variado de líquido percolado/filtrado resultante da fase de desidratação do lodo sobre o composto orgânico, são as constantes das tabelas A.89 a A.93.

**Tabela A.89. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso1.**

Vaso 1 (taxa de aplicação de água deionizada – 150ml/dia)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
16.09	1	0,045	0662	188	200	3,7	8,2
17.09	2	0,105	0331	200	150	3,0	8,2
18.09	3	0,120	0165	190	150	2,0	8,2
19.09	4	0,105	0165	167	150	3,7	8,2
22.09	5	0,115	0165	176	150	2,2	8,3
23.09	6	0,105	ND(*)	192	150	2,2	8,3
24.09	7	0,125	ND	186	150	1,3	8,4
25.09	8	0,125	ND	181	200	1,5	8,4
26.09	9	0,120	ND	179	200	1,3	8,4

\*ND- não detectado

**Tabela A.90. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso2.**

Vaso 2 (taxa de aplicação de percolado– 150ml/dia)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
16.09	1	0,050	0,415	225	200	6,5	8,2
17.09	2	0,110	0,415	226	150	2,6	8,2
18.09	3	0,115	0,165	197	150	2,8	8,3
19.09	4	0,120	0,331	191	150	4,5	8,3
22.09	5	0,115	0,165	186	150	3,7	8,3
23.09	6	0,100	0,331	217	150	2,2	8,3
24.09	7	0,125	ND(*)	200	150	2,3	8,3
25.09	8	0,120	ND	200	200	2,6	8,4
26.09	9	0,120	ND	198	200	3,0	8,3

\*ND- não detectado

**Tabela A.91. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso3.**

Vaso 3 (taxa de aplicação de percolado– 200ml/dia)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
16.09	1	0,105	0,331	198	200	6,5	8,2
17.09	2	0,165	0,415	206	150	1,5	8,2
18.09	3	0,165	0,165	192	150	2,2	8,2
19.09	4	0,175	0,248	163	150	2,4	8,2
22.09	5	0,170	0,165	162	150	3,2	8,4
23.09	6	0,155	ND(*)	179	150	1,7	8,3
24.09	7	0,180	ND	187	150	1,8	8,4
25.09	8	0,170	ND	184	200	2,7	8,2
26.09	9	0,170	ND	180	200	2,0	8,3

\*ND- não detectado

**Tabela A.92. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso4.**

Vaso 4 (taxa de aplicação de percolado– 250ml/dia)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
16.09	1	0,125	0,331	181	200	5,5	8,1
17.09	2	0,195	0,165	178	150	2,7	8,0
18.09	3	0,210	0,165	170	150	5,0	8,1
19.09	4	0,215	0,165	139	150	5,0	8,1
22.09	5	0,215	0,165	150	150	6,0	8,3
23.09	6	0,200	ND(*)	173	150	3,3	8,2
24.09	7	0,230	0,165	155	150	3,4	8,3
25.09	8	0,225	ND	174	200	3,0	8,2
26.09	9	0,225	ND	179	200	2,0	8,2

\*ND- não detectado

**Tabela A.93. Concentrações dos parâmetros observados no percolado do composto orgânico no Vaso5.**

Vaso 5 (taxa de aplicação de percolado– 300ml/dia)							
Coleta	Am	V(L)	Al <sup>3+</sup> (mg/L)	DQO(mg/L)	Cor(mg Pt/L)	Turb(UNT)	pH
16.09	1	0,155	0,331	146	200	5,0	8,0
17.09	2	0,195	0,165	157	150	1,8	8,1
18.09	3	0,240	0,165	145	150	2,8	8,0
19.09	4	0,245	0,165	230	150	12	8,1
22.09	5	0,235	ND	113	150	15	8,3
23.09	6	0,250	ND	152	150	7,0	8,1
24.09	7	0,255	0,165	182	150	7,3	8,2
25.09	8	0,275	ND	159	200	3,4	8,1
26.09	9	0,250	ND	160	200	6,5	8,2

\*ND- não detectado

As cargas de alumínio total e DQO, parâmetros para os quais foi dada maior ênfase durante a realização da pesquisa, são as constantes das tabelas A.94 a A.98 em seqüência.

**Tabela A.94. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 1.**

Vaso 1 (taxa de aplicação de água deionizada – 150ml/dia)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
16.09	1	0,045	0,0297	8,46
17.09	2	0,105	0,0347	21,00
18.09	3	0,120	0,0198	22,80
19.09	4	0,105	0,0173	17,53
22.09	5	0,115	0,0189	20,24
23.09	6	0,105	0,0000	20,16
24.09	7	0,125	0,0000	23,25
25.09	8	0,125	0,0000	22,62
26.09	9	0,120	0,0000	21,48
		$\Sigma = 0,965$	$\Sigma = 0,1204$	$\Sigma = 177,54$

**Tabela A.95. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 2.**

Vaso 2 (taxa de aplicação de percolado – 150ml/dia)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
16.09	1	0,050	0,0207	11,25
17.09	2	0,110	0,0456	24,86
18.09	3	0,115	0,0189	22,65
19.09	4	0,120	0,0397	22,92
22.09	5	0,115	0,0189	21,39
23.09	6	0,100	0,0331	21,70
24.09	7	0,125	0,0000	25,00
25.09	8	0,120	0,0000	24,00
26.09	9	0,120	0,0000	23,76
		$\Sigma = 0,975$	$\Sigma = 0,1769$	$\Sigma = 197,53$

**Tabela A.96. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 3.**

Vaso 3 (taxa de aplicação de percolado – 200ml/dia)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
16.09	1	0,105	0,0347	20,79
17.09	2	0,165	0,0684	33,99
18.09	3	0,165	0,0272	31,68
19.09	4	0,175	0,0434	28,52
22.09	5	0,170	0,0280	27,54
23.09	6	0,155	0,0000	27,74
24.09	7	0,180	0,0000	33,66
25.09	8	0,170	0,0000	31,28
26.09	9	0,170	0,0000	30,60
		$\Sigma = 1,455$	$\Sigma = 0,2017$	$\Sigma = 265,80$

**Tabela A.97. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 4**

Vaso 4 (taxa de aplicação de percolado – 250ml/dia)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
16.09	1	0,125	0,0413	22,62
17.09	2	0,195	0,0321	34,71
18.09	3	0,210	0,0346	35,70
19.09	4	0,215	0,0354	29,88
22.09	5	0,215	0,0354	32,25
23.09	6	0,200	0,0000	34,60
24.09	7	0,230	0,0379	35,65
25.09	8	0,225	0,0000	39,15
26.09	9	0,225	0,0000	40,27
		$\Sigma = 1,84$	$\Sigma = 0,2167$	$\Sigma = 304,83$

**Tabela A.98. Cargas de alumínio total e DQO observadas no percolado do Vaso 5**

Vaso 5 (taxa de aplicação de percolado – 300ml/dia)				
Coleta	Amostra	Volume(L)	Al <sup>3+</sup> (mg)	DQO (mg)
16.09	1	0,155	00513	22,71
17.09	2	0,195	00321	30,61
18.09	3	0,240	00396	34,80
19.09	4	0,245	00404	56,35
22.09	5	0,235	00000	26,55
23.09	6	0,250	00000	38,00
24.09	7	0,255	00420	46,41
25.09	8	0,275	00000	43,72
26.09	9	0,250	00000	40,00
		$\Sigma = 2,10$	$\Sigma = 0,2054$	$\Sigma = 339,07$

A análise comparativa dos resultados observados para as cargas de alumínio total lixiviadas após a aplicação de diferentes soluções ácidas sobre o lodo desidratado em leitos de secagem com diferentes espessura de leito drenante de areia.

Tabela A.99. Comparação entre as cargas de alumínio lixiviadas do lodo desidratado em leitos de secagem com leito drenante de areia, após aplicação de diferentes soluções ácidas

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcalc.</i>	<i>F cri(1%)</i>	<i>F cri(5%)</i>
Amostra(pH)	0,00240444	2	0,00120222	2,43519379	8,0215159	4,25649205
Colunas(leitos)	0,00039564	2	0,00019782	0,4007004	8,0215159	4,25649205
Interações(pH - leitos)	0,00184579	4	0,00046145	0,93469921	6,42205578	3,63309027
Dentro	0,00444317	9	0,00049369			
Total	0,00908904	17				

A análise comparativa dos resultados observados para as cargas de alumínio total e de DQO lixiviadas após a aplicação de água deionizada sobre o composto orgânico.

Tabela A.100. Comparação entre as cargas de DQO lixiviadas dos vasos com composto orgânico (150ml de água deionizada)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcalc.</i>	<i>F cri(1%)</i>	<i>F cri(5%)</i>
Entre grupos(vaso)	420,825524	4	105,206381	1,46386499	3,82829057	2,60597233
Dentro dos grupos	2874,7564	40	71,86891			
Total	3295,58192	44				

Tabela A.101. Comparação entre as cargas de alumínio lixiviadas dos vasos com composto orgânico (150ml de água deionizada)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcalc.</i>	<i>F cri(1%)</i>	<i>F cri(5%)</i>
Entre grupos(vaso)	0,00623022	4	0,00155756	0,26686669	3,84250143	3,82829057
Dentro dos grupos	0,23345822	40	0,00583646			
Total	0,23968844	44				

A análise comparativa dos resultados observados para as cargas de alumínio total e de DQO lixiviadas após a aplicação de água deionizada sobre o composto orgânico.

Tabela A.102. Comparação entre as cargas de alumínio lixiviadas dos vasos com composto orgânico (aplicação de cargas diferentes de percolado)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcalc.</i>	<i>F cri(1%)</i>	<i>F cri(5%)</i>
Entre grupos(vasos)	0,00065952	4	0,00016488	0,43084006	3,82829057	2,60597233
Dentro dos grupos	0,01530774	40	0,00038269			
Total	0,01596726	44				

Tabela A.103. Comparação entre as cargas de DQO lixiviadas dos vasos com composto orgânicos (aplicação de cargas diferentes de percolado)

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcalc.</i>	<i>F crítico (1%)</i>	<i>F crítico (5%)</i>
Entre grupos(vasos)	2123,23812	4	530,80953	13,7820128	3,82829057	2,60597233
Dentro dos grupos	1540,58638	40	38,5146594			
Total	3663,8245	44				



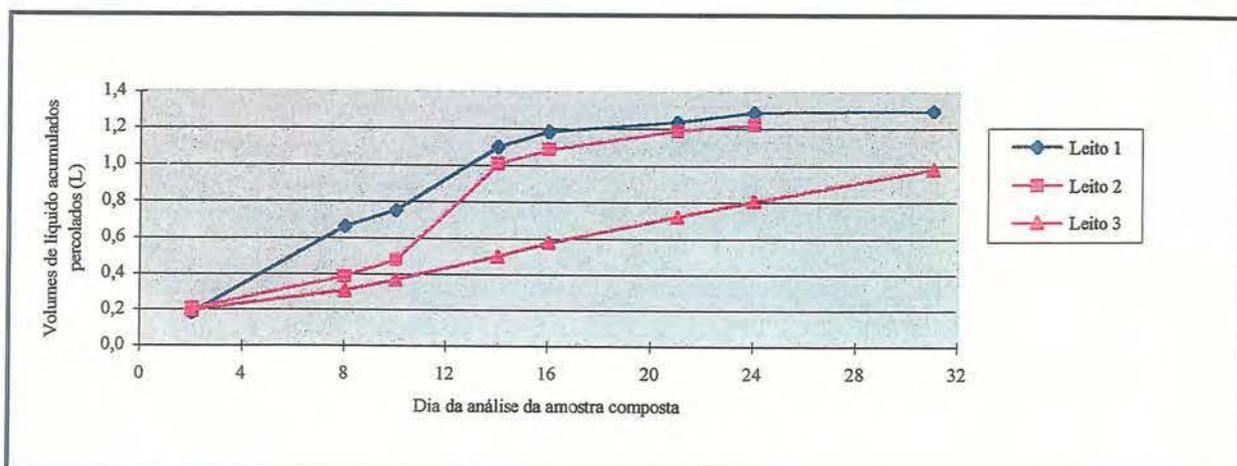


Figura B1. Volumes de líquido acumulados percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho)

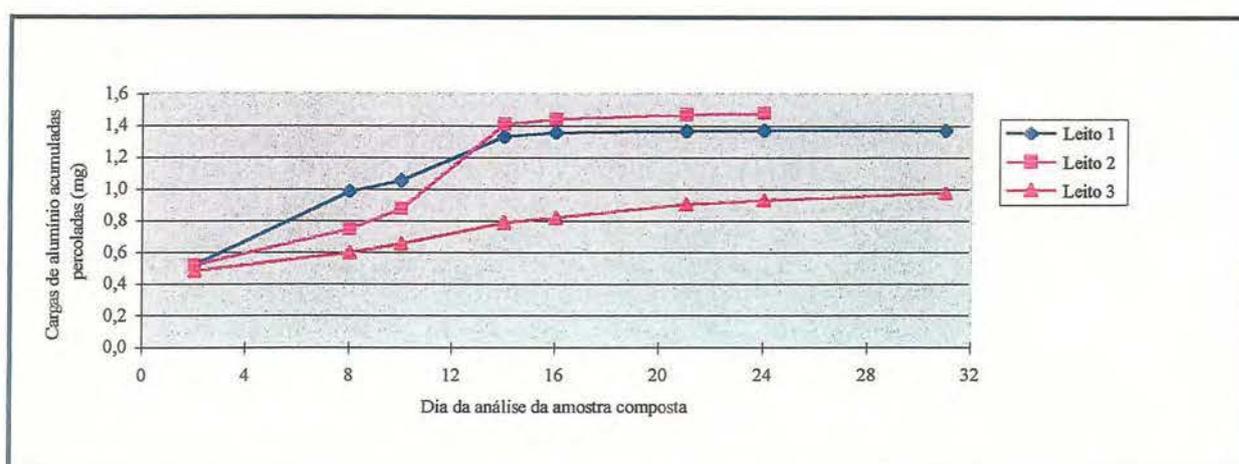


Figura B2. Cargas de alumínio acumuladas percoladas nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho)

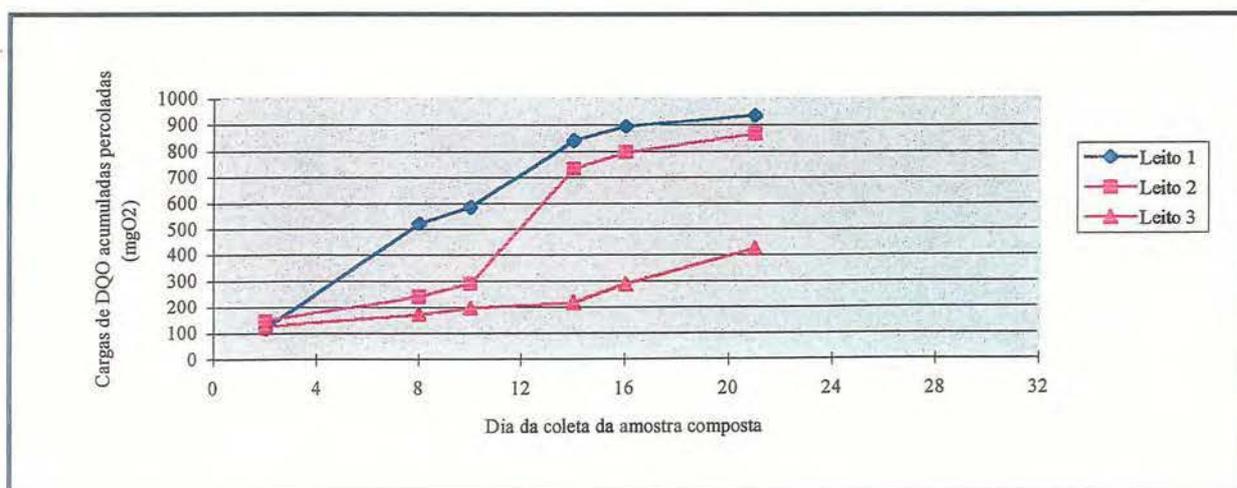


Figura B3. Cargas de DQO acumuladas percoladas nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho)

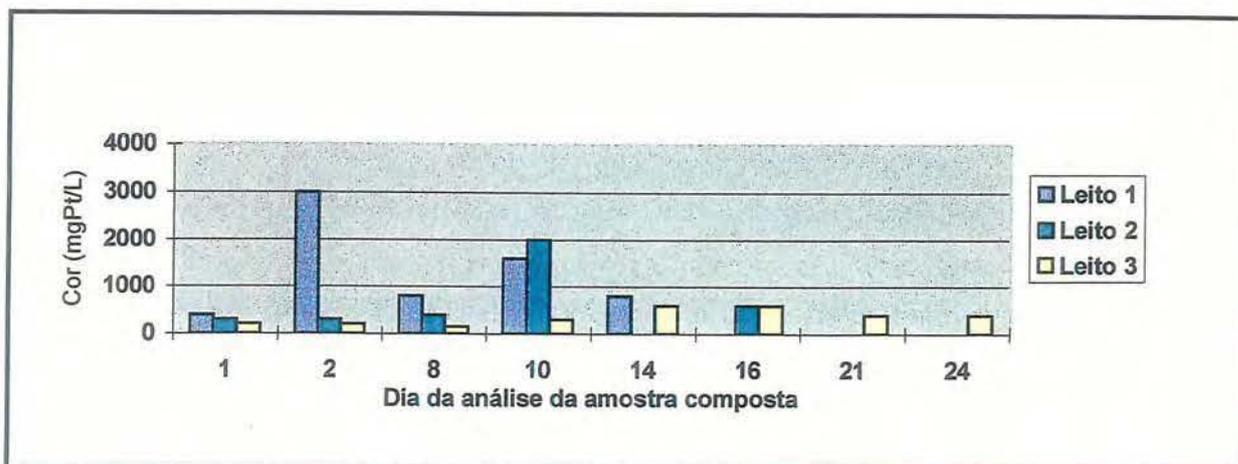


Figura B4. Concentração de cor nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho)

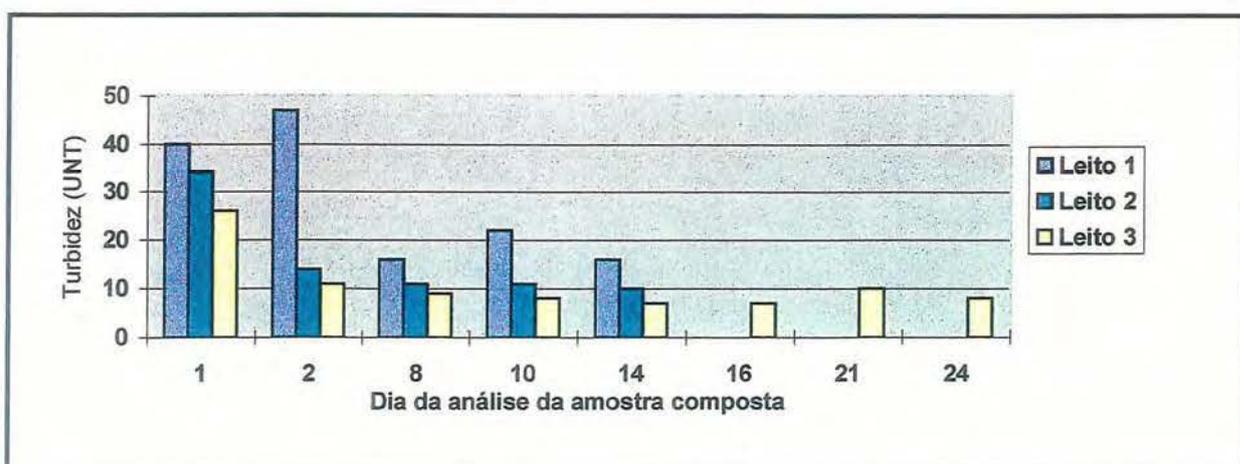


Figura B5. Concentração de turbidez nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho)

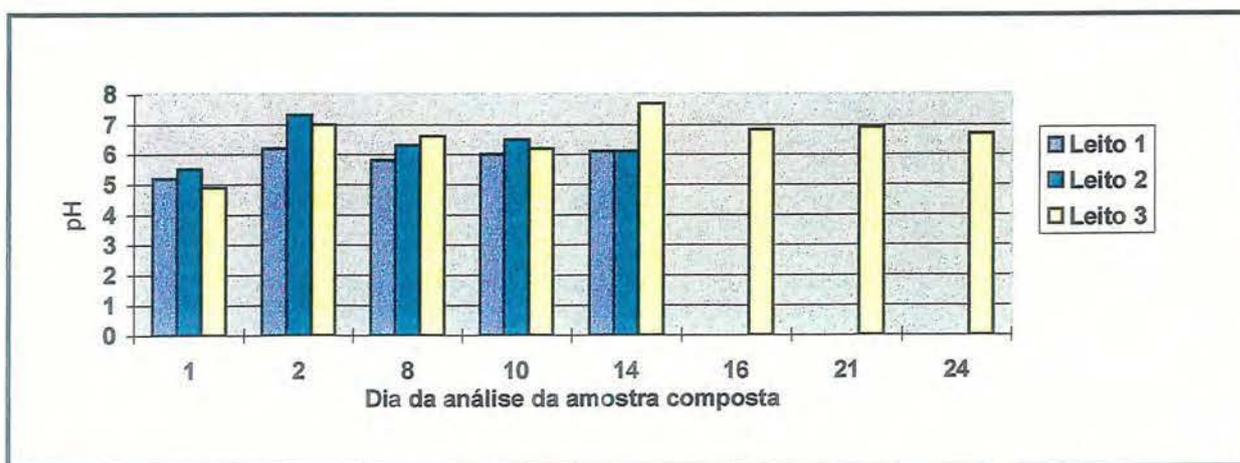


Figura B6. Variação do pH nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo velho)

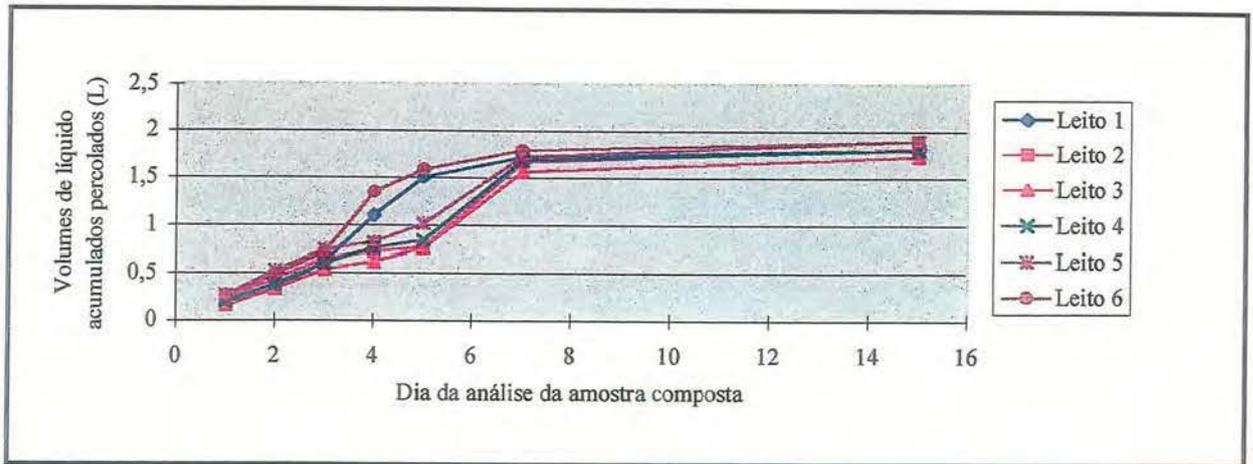


Figura B7. Volumes de líquidos acumulados percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo)

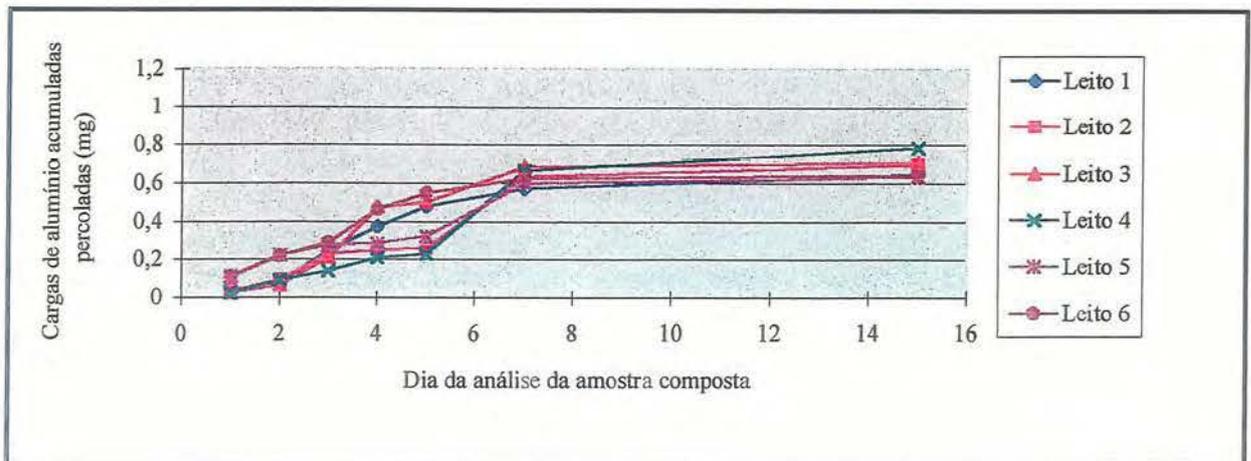


Figura B8. Cargas de alumínio acumuladas percoladas nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo)

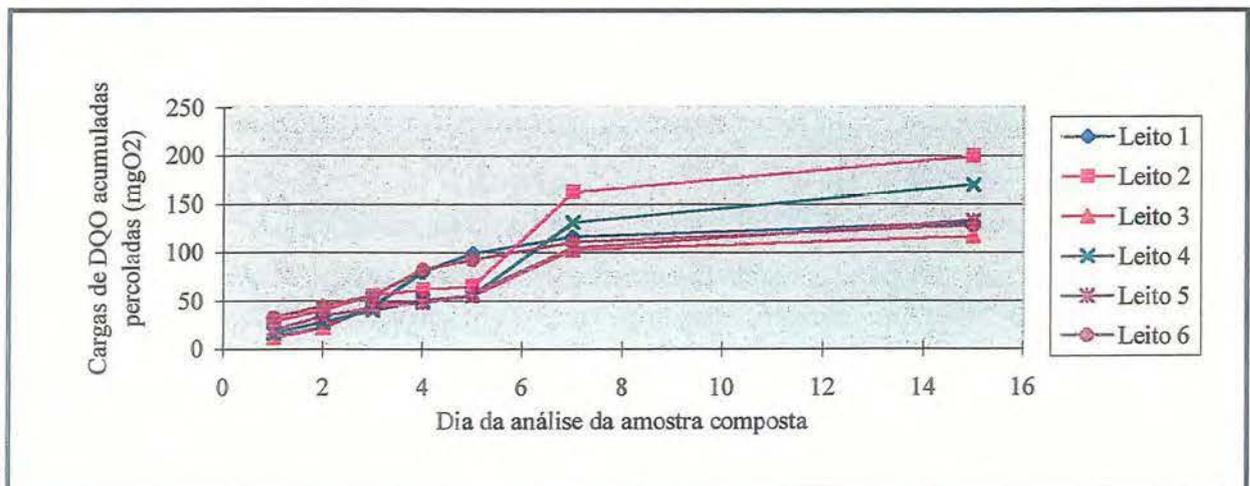


Figura B9. Cargas de DQO acumuladas percoladas nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo)

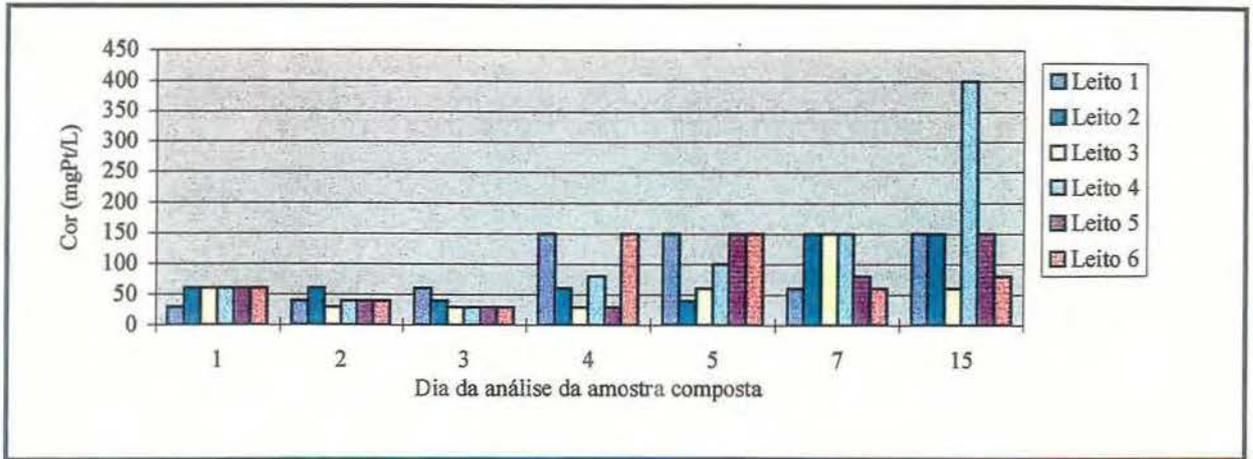


Figura B10. Concentração de cor nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo)

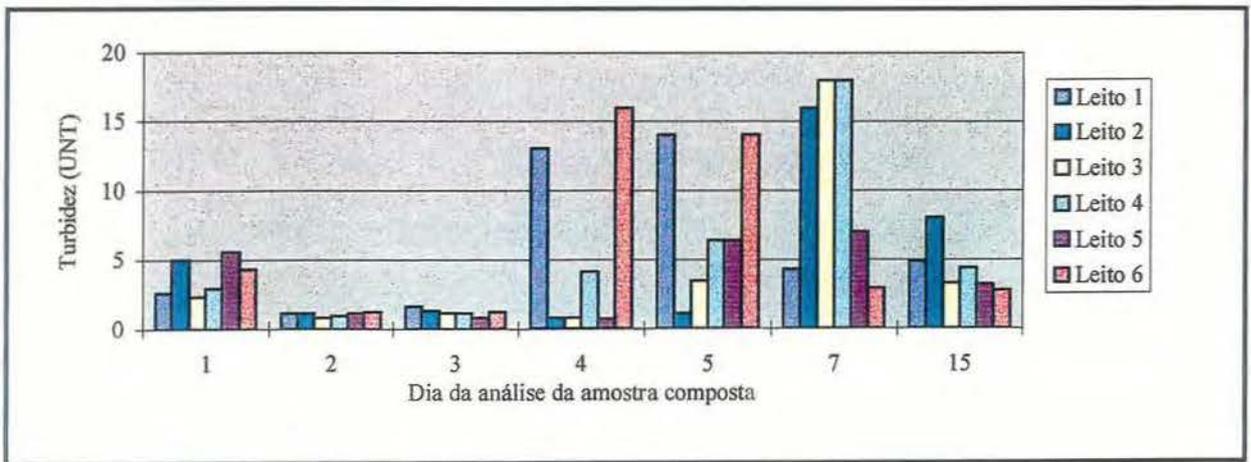


Figura B11. Concentração de turbidez nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo)

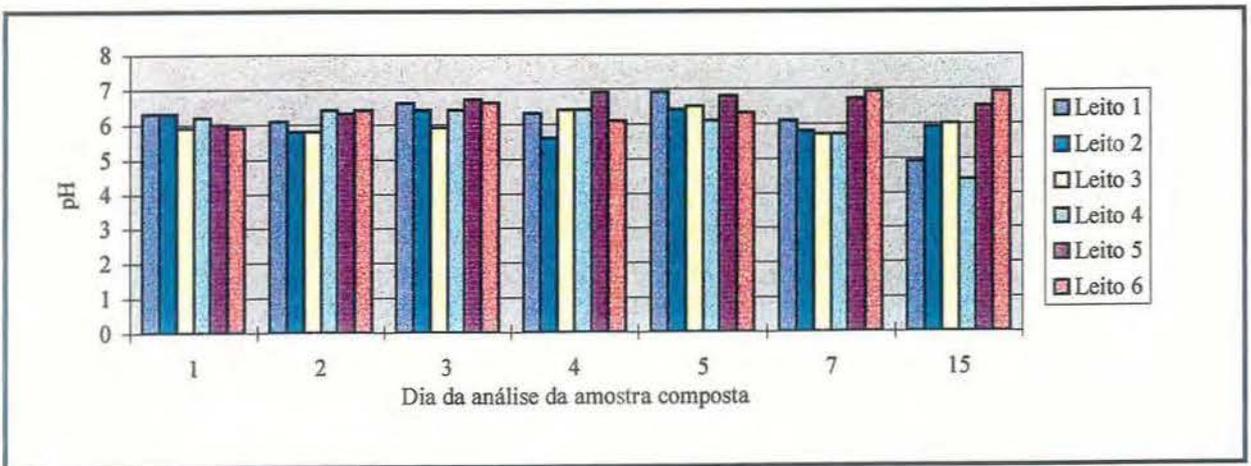


Figura B12. Variação do pH nos percolados nos leitos com meio drenante de areia (lodo novo)

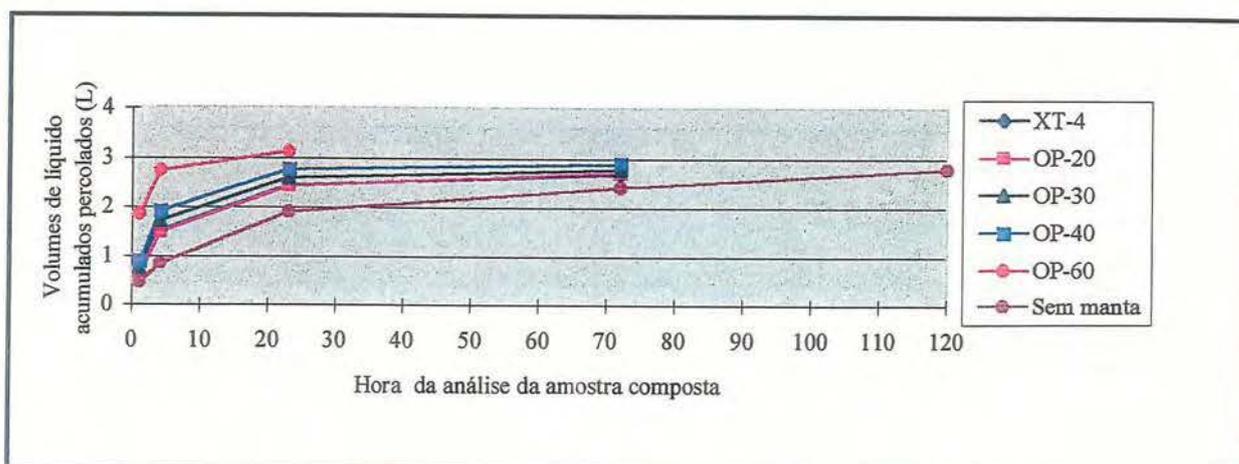


Figura B13. Volumes acumulados percolados nos leitos com meio drenantes de mantas geotêxteis

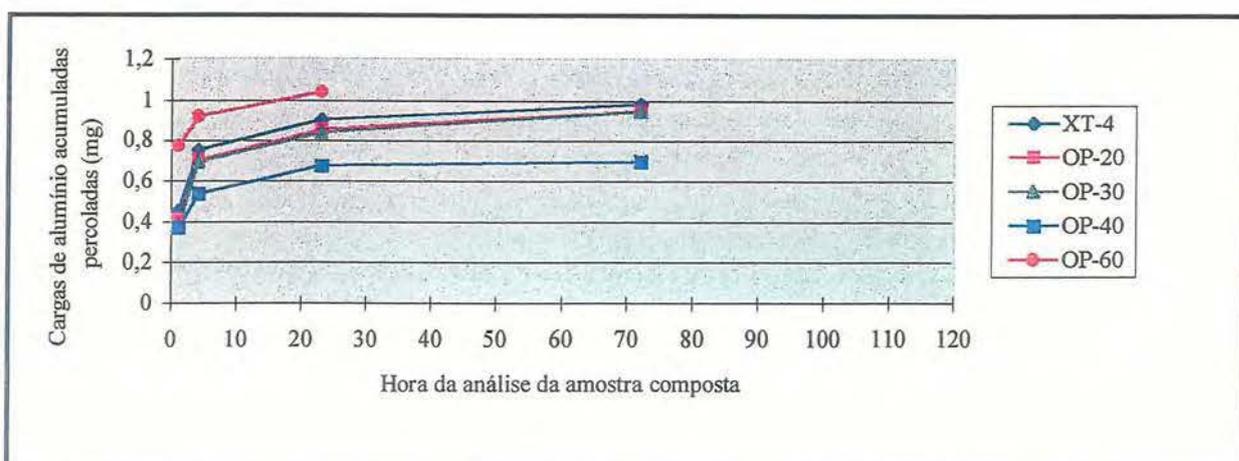


Figura B14. Cargas de alumínio acumuladas percoladas nos leitos com meio drenantes de mantas geotêxteis

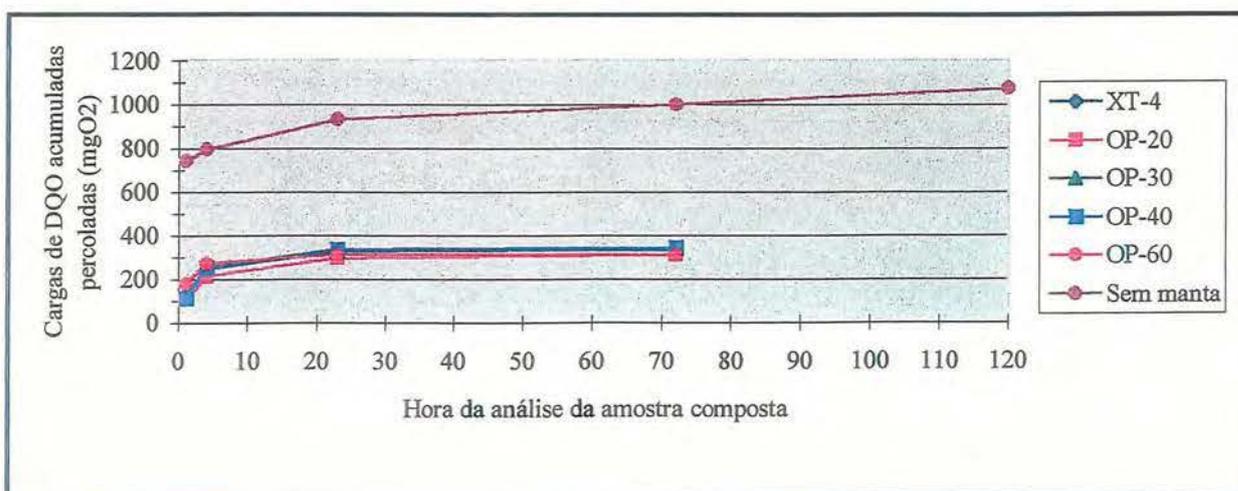


Figura B15. Cargas de DQO acumuladas percoladas nos leitos com meio drenantes de mantas geotêxteis

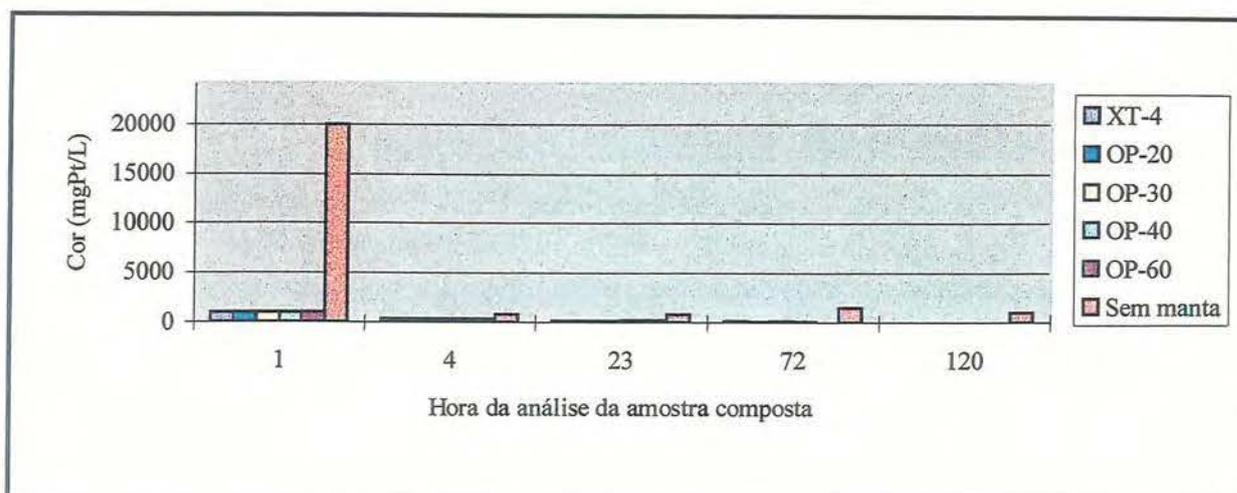


Figura B16. Concentração de cor nos percolados nos leitos com meio drenante de mantas geotêxteis

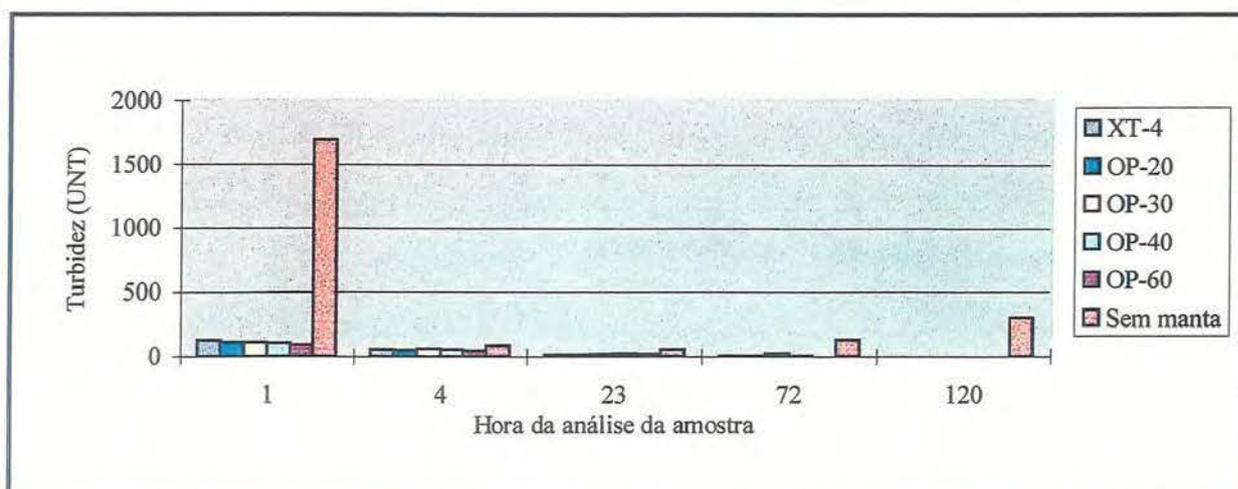


Figura B17. Concentração de turbidez nos percolados nos leitos com meio drenante de mantas geotêxteis

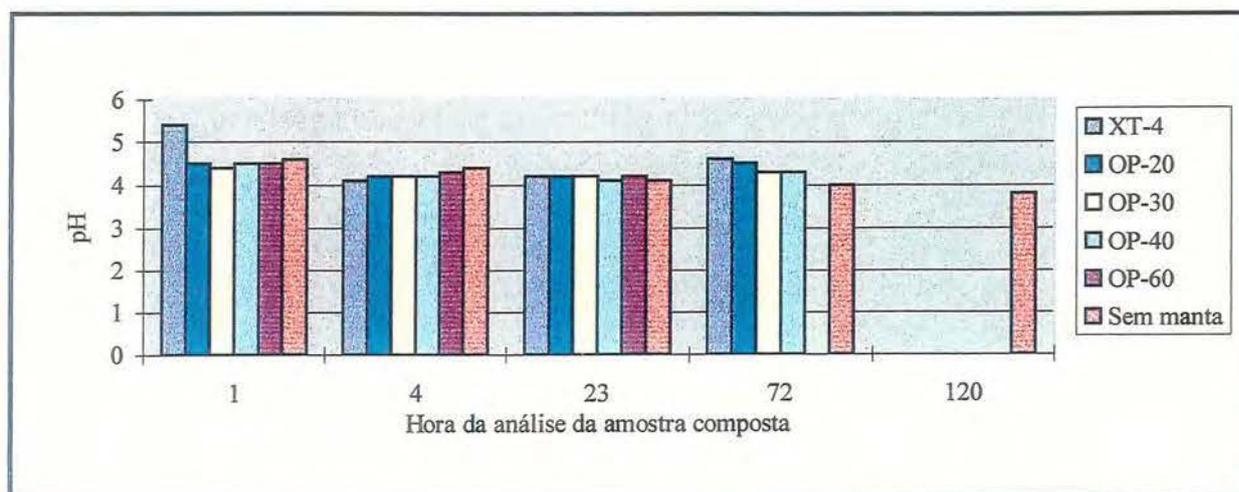


Figura B18. Variação do pH nos percolados nos leitos com meio drenante de mantas geotêxteis

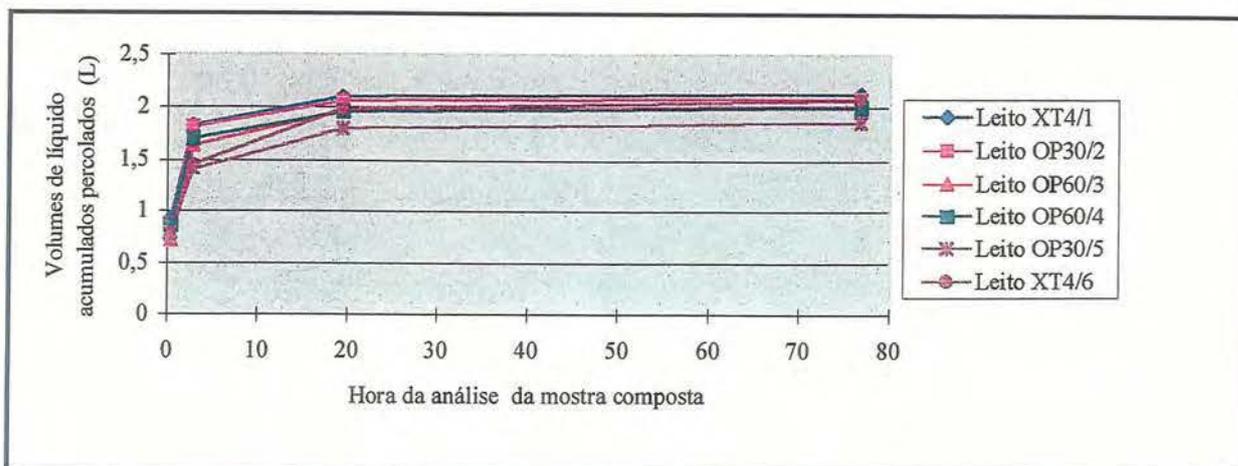


Figura B19. Volumes acumulados percolados nos leitos com meio drenante constituídos por areia e mantas geotêxteis

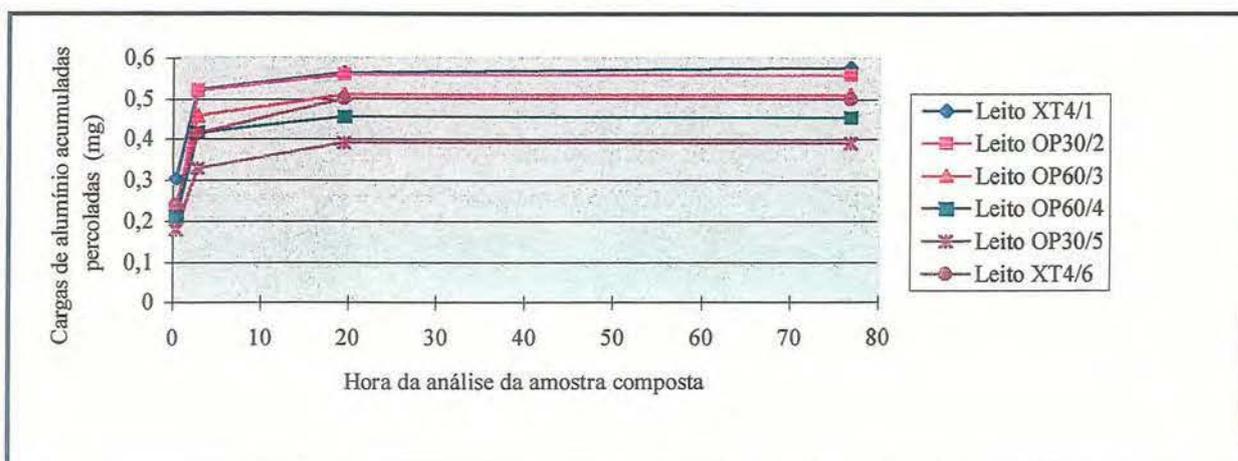


Figura B20. Cargas de alumínio acumuladas percoladas nos leitos com meio drenante constituídos por areia e mantas geotêxteis

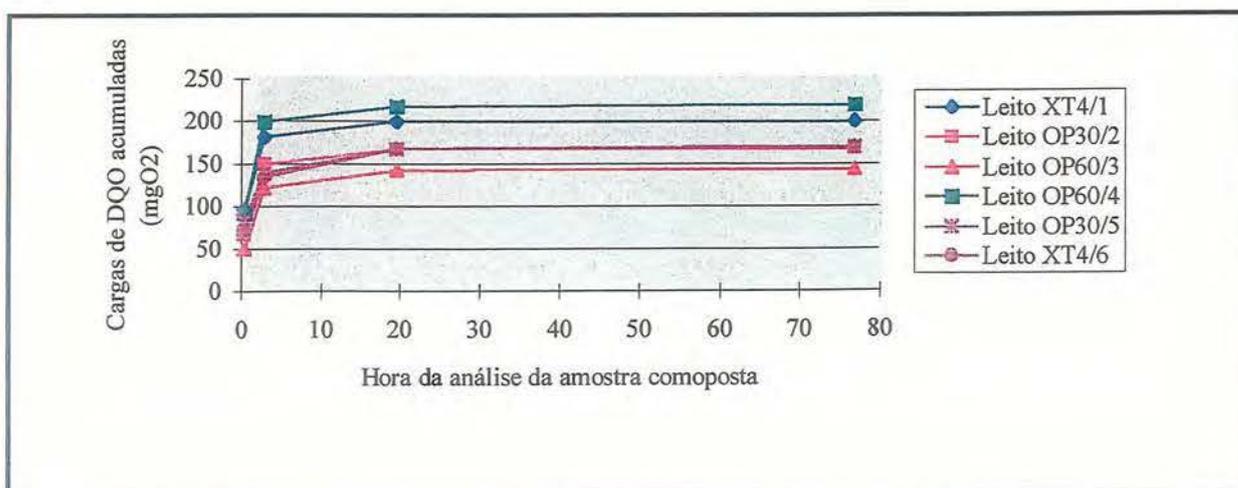


Figura B21. Cargas de DQO acumuladas percoladas nos leitos com meio drenante constituídos por areia e mantas geotêxteis

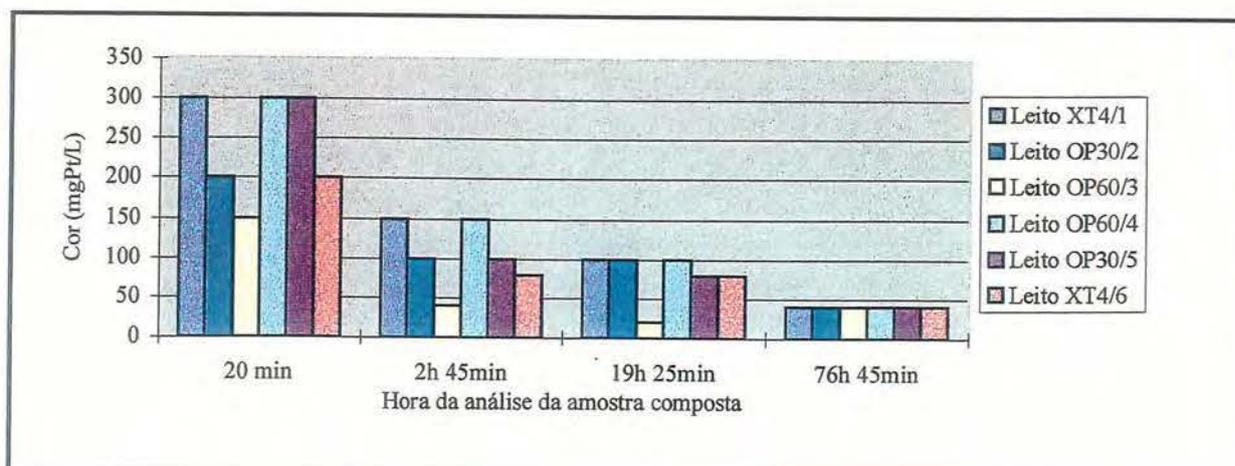


Figura B22. Concentração de cor nos percolados nos leitos com meio drenante constituídos por areia e mantas geotêxteis

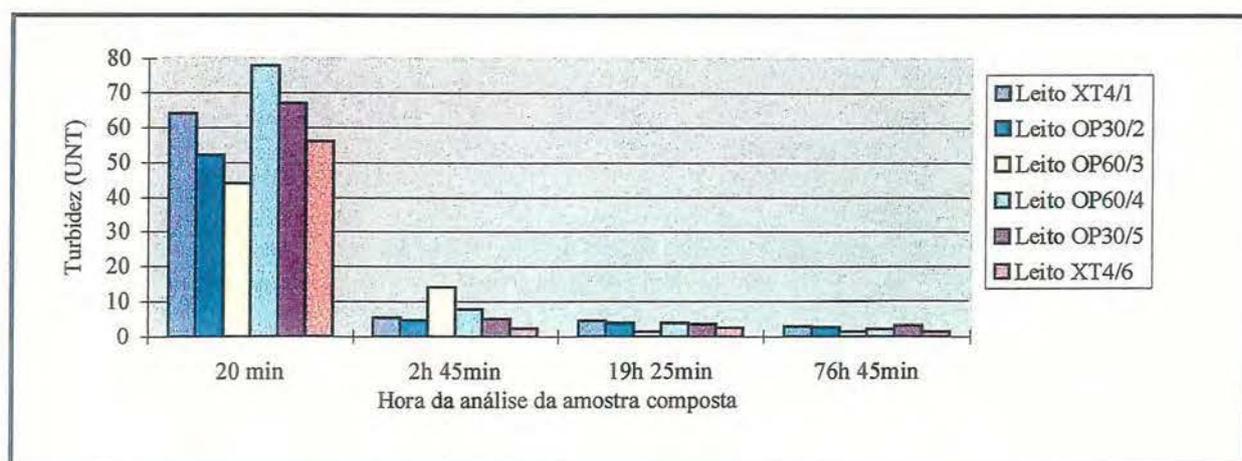


Figura B23. Concentração de turbidez nos percolados nos leitos com meio drenante constituídos por areia e mantas geotêxteis

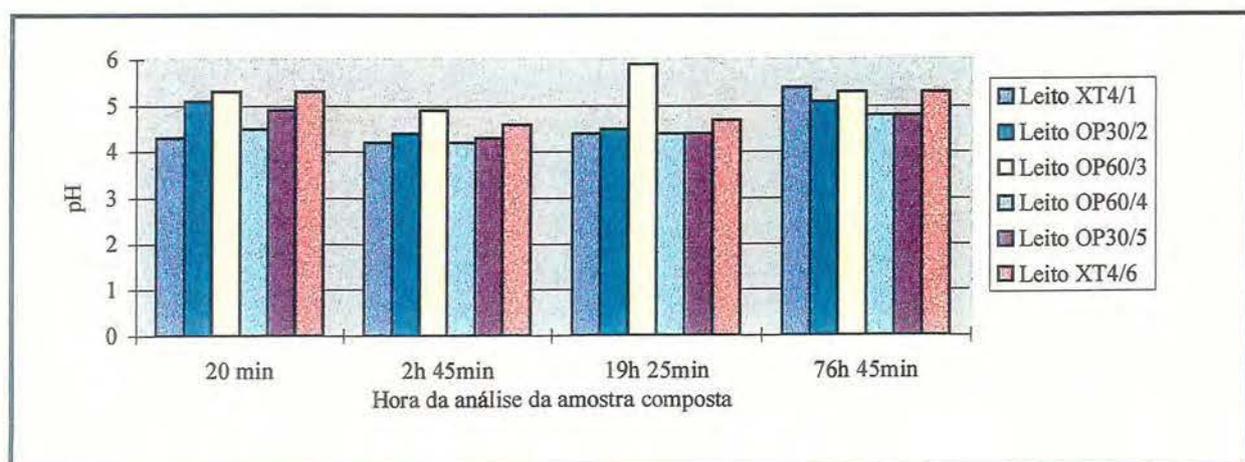


Figura B24. Variação do pH nos percolados nos leitos com meio drenante constituídos por areia e mantas geotêxteis